

# Flom i Otta; en analyse av direkte og indirekte konsekvenser for vei og jernbane

Ole Fjellstad Holt



Masteroppgave

Geofarer og geomekanikk

60 studiepoeng

Institutt for geofag

Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

Mai/2022

© Ole Fjellstad Holt

2022

Flom i Otta; en analyse av direkte og indirekte konsekvenser for vei og jernbane

Ole Fjellstad Holt

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo

## Sammendrag

Denne oppgaven studerer konsekvensene som flom har på vei og jernbane i Ottaområdet. Oppgaven søker å gi økt kunnskap om slike konsekvenser, samt å forbedre hvordan man kan vurdere konsekvensene. Fokuset i denne oppgaven er på hovedvassdrag, der elvene Gudbrandsdalslågen og Otta blir undersøkt.

Oppgaven er tredelt. I den første delen utvikles en metode som finner hvor lenge ulike vannføringer i gjennomsnitt vil overstige et visst flomnivå. I den andre delen analyseres direkte skader på vei og jernbane i studieområdet. Dette gjøres ved å modellere farekart i programmet HEC-RAS. Farekartene kobles til infrastrukturen i programmet ArcGIS, der skade- og kostnadsberegninger blir utført. I den tredje delen studeres de indirekte konsekvensene. Her utvikles det en metode for å finne kostnaden som følger av stengt vei. Metoden kombinerer de utregnede gjennomsnittlige varighetene fra del en, med de modellerte farekartene fra del to. Her vurderes tidstap og kjøretøykostnader som veitrafikantene får ved flomhendelser, samt tidstapkostnader tilknyttet fjerntogtrafikken i studieområdet.

Analysen av de direkte skadene ved flom, viser at infrastrukturen i Ottaområdet er sårbar for denne typen skader. Dovrebanen, E6 og Rv15 har en forventet årlig kostnad tilknyttet direkte skader i studieområdet, på henholdsvis 1 087 239kr, 604 071kr og 59 859kr, medregnet klimapåslag. Beregninger viser at klimaendringenes effekt på kostnader tilknyttet direkte skader i studieområdet, øker med 635% for E6, 899% for Rv15 og 507% for jernbanen. De benyttede skadefunksjonene brukt i beregningen av skade, er vurdert og funnet lite egnet for detaljanalyser som dette arbeidet er. Den utviklede metoden fra del en har vist seg å være anvendbar når det gjelder å regne ut indirekte kostnader som følge av flom. Metoden gir imidlertid noe usikre resultater, blant annet på grunn av lav tidsoppløsning på vannføringsseriene i studieområdet. Metoden for å beregne indirekte kostnader har vist seg å være formålstjenlig og gir resultat som viser at studieområdet er sårbart for flom. Den tar ikke høyde for nedetid tilknyttet reparasjon, og kostnadsestimatet blir derfor noe lavt. Metoden kan benyttes for å beregne indirekte kostnader også på andre vassdrag.

## Forord

Jeg vil takke min hovedveileder Anders Solheim for god hjelp og interessante diskusjoner, og for å koble meg på personer i sitt store nettverk. Jeg vil også takke medveileder Kolbjørn Engeland for god veiledning.

Jeg vil gjerne få takke Fredrik Dingsør-Dehlin som har vært til stor hjelp i undersøkelsen av de indirekte konsekvensene, og Per Ludvig Bjerke og Byman Hamududu i NVE for å introdusere meg til HEC-RAS, og Ingar Haug Steinholt for nyttig tilbakemelding om HEC-RAS-modellen.

Stor takk til både Geir Vatne i Bane NOR og Heidi Bjordal i Statens vegvesen for nyttige og gode innspill.

Videre vil jeg takke NGI-temaet i NordicLink for en hyggelig befarung i Otta og for å gi meg muligheten til å skrive master om et tema jeg synes er svært interessant.

Jeg vil takke familien min for god støtte og korrekturlesning under arbeidet.

Masterskrivingen har vært en utfordrende periode med sine opp- og nedturer, og læringskurven har vært bratt.

Til slutt vil jeg si at jeg er stolt over sluttresultatet.

Ole Fjellstad Holt

Oslo, mai 2022

# Innholdsfortegnelse

Figurer .....	vi
Tabeller .....	xi
1 Innledning .....	1
1.1 Oppgavens mål, relevans og oppbygning.....	2
1.2 Tidligere arbeid .....	4
2 Teori .....	5
2.1 Flom.....	5
2.1.1 Egenskaper og karakteristikk med flom.....	6
2.1.2 Klassifisering av flom .....	7
2.1.3 Flomkart .....	9
2.2 Risiko .....	9
2.2.1 Beregningsmetoder.....	10
2.2.2 Fare.....	10
2.2.3 Sårbarhet.....	12
2.2.4 Utsatte elementer .....	12
2.3 Konsekvenser .....	13
2.4 Flomskader på infrastruktur.....	13
3 Områdebeskrivelse .....	16
3.1 Studieområdet .....	16
3.2 Gudbrandsdalslågen.....	18
3.3 Ottaelven.....	20
3.4 Flommer i studieområdet de siste årene .....	22
4 Metode.....	24
4.1 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet.....	25

4.2	Direkte konsekvenser som følge av flom på infrastrukturen .....	29
4.2.1	Strømning.....	29
4.2.2	Terrengdata.....	32
4.2.3	Kalibrering og Manningskoeffisienter .....	34
4.2.4	Hydrologiske data.....	37
4.2.5	Skadefunksjoner .....	39
4.2.6	Skadegrad, kostnader og risiko .....	40
4.3	Indirekte konsekvenser fra flom på infrastrukturen .....	45
5	Resultater .....	51
5.1	Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet.....	51
5.1.1	Lalm .....	52
5.1.2	Lalm tilsig.....	54
5.1.3	Rosten .....	55
5.1.4	Arbeidsserien .....	57
5.2	Direkte konsekvenser av flom på infrastrukturen.....	59
5.2.1	Skadegrad ved 200-årsflom.....	60
5.2.2	Forventet årlig kostnad .....	63
5.2.3	Vurdering av skadefunksjoner ved bruk av buffer og hastighetskart.....	67
5.3	Indirekte konsekvenser knyttet til stenging av infrastrukturen .....	70
5.3.1	Stenging av infrastruktur.....	70
5.3.2	Indirekte kostnader .....	76
6	Diskusjon .....	80
6.1	Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet.....	80
6.1.1	Tidsoppløsning .....	80
6.1.2	Tilpasningskurve.....	82
6.1.3	Regulering .....	82

6.1.4	Minimum-tidsintervall og tidspunkt for kulminasjon.....	83
6.1.5	Skalering av flommers varighet.....	84
6.1.6	Samlet vurdering av varighetsanalysen.....	85
6.2	Direkte konsekvenser som følge av flom på infrastrukturen.....	86
6.2.1	HEC-RAS modell.....	86
6.2.2	Skadefunksjoner.....	88
6.2.3	Skadekart, risiko og kostnad.....	90
6.2.4	Samlet vurdering av direkte skade.....	93
6.3	Indirekte konsekvenser knyttet til stenging av infrastrukturen.....	94
6.3.1	Modellenes generelle antagelser.....	94
6.3.2	Analyse av modellen benyttet for å beregne kostnader for vei.....	96
6.3.3	Analyse av modellen benyttet for å beregne kostnader for jernbanen.....	99
6.3.4	Kostnader tilknyttet ulike handlingsmønstre hos trafikantene.....	100
6.3.5	Forventet årlig kostnad.....	103
6.3.6	Andre indirekte kostnader.....	103
6.3.7	Samlet vurdering av indirekte konsekvenser.....	103
6.4	Forholdet mellom indirekte og direkte konsekvenser.....	104
6.5	Sikringstiltak.....	105
6.6	Klima.....	106
6.7	Oppsummering av usikkerheter.....	107
7	Konklusjon.....	109
7.1	Forslag til videre arbeid.....	111
8	Bibliografi.....	112

## Figurer

Figur 1: Hjulstrømskurve viser forholdet mellom vannets hastighet og erosjon, transport og sedimentasjon av løse partikler (Nichols, 2009). .....	5
Figur 2: Figuren viser et eksempel på vannføringer ved samløpet av to vassdrag. Rød kurve viser vannføringen etter samløpet, og de blå for de to elvene rett før samløpet. Kulminasjonstidspunktet er forskjellig for vassdragene. Figuren er hentet fra NVE (2020b)..	7
Figur 3 Andelen regnbidrag til flommene ved ulike enkeltstasjoner i Norge (Engeland, 2016). .....	8
Figur 4: Fare og sårbare og utsatte elementer skaper en risiko. Hentet fra (SDEA, u.å.) og modifisert.....	10
Figur 5. Eksempel på en kumulativ fordelingsfunksjon for vannføringer. ....	11
Figur 6: Ulike skadefunksjoner. y-aksen viser skade i andel av maksimal skade, x-aksen viser vanndybden (Vanneuville et al., 2005). ....	12
Figur 7: Figuren viser et tverrsnitt av en standard jernbane (Wathne et al., 1999).....	14
Figur 8: Erosjon på bane i Gudbrandsdalen som følge av flommen i 2011. (Jernbaneverket, u.å.). ....	15
Figur 9: Erosjon på bane som følge av flom i sideelv under flommen i 2011 i Gudbrandsdalen. Det er fare for skade på det elektriske anlegget som ligger i betongkanalen til høyre i bildet. (Jernbaneverket, u.å.). ....	15
Figur 10 Studieområdet er innenfor den røde rammen på bildet til venstre, mens lokaliseringen i Sør-Norge er vist med rød prikk på kartet til høyre. ....	16
Figur 11: Infrastruktur i studieområdet. Fv2628 går opp på fjellet og har derfor ikke noe gjennomfartstrafikk. ....	17
Figur 12: Nedbørsfeltet til Lågen er merket blått. Byen Otta er markert med rødt punkt. (NEVINA). ....	18
Figur 13: Hypsografisk kurve for dreneringsnettets til Lågen nord for byen Otta. (NEVINA)..	19
Figur 14: Arealfordeling til dreneringsnettets til Lågen nord for byen Otta (NEVINA). ....	19
Figur 15: Figuren viser plasseringen til de hydrologiske stasjonene Roste og Lalm i forhold til studieområdet.....	19
Figur 16: Figuren viser den største daglige vannføringen som er registrert ved Rosten i de ulike årene.....	20



Figur 17: Diagrammet viser når på året den årlige maksimale flommen har forekommet ved Rosten. Styrken på flommen er illustrert ut fra sentrum av figuren .....	20
Figur 18: Nedbørsfeltet til elven Otta, merket blått. Byen Otta er markert med et rødt punkt. (NEVINA) .....	20
Figur 19: Hypsografisk kurve for Otta (NEVINA) .....	21
Figur 20: Arealfordelingen til Otta nedbørsfelt(NEVINA).....	21
Figur 21: Den maksimale årlige vannføringen ved Lalm. ....	22
Figur 22: Diagrammet viser når på året de fem prosent høyeste daglige vannføringene i perioden 1972-2022 har forekommet ved Lalm. ....	22
Figur 23: Figuren viser en overskridelse, hvor flomtoppen/flombølgen er høyere enn terskelvannføringen. Grønt punkt gir overskridelsens startpunkt og rødt punkt gir sluttpunktet.....	26
Figur 24: Illustrasjon av hvordan algoritmen slår sammen to flomtopper.....	27
Figur 25: Viser hvordan vann blir sendt inn i modellen via en strømningshydrograf. Y-aksen er vannføringen som sendes inn igjennom de øvre grensebetingelsene og x-aksen gir tidspunkt. ....	31
Figur 26: Terrengmodellen for studieområdet i meter over havet. Nedre grensebetingelse er vist med lilla strek og de øvre grensebetingelsene med blå streker.....	32
Figur 27: Figuren viser hvordan ulik rutenett er benyttet på ulike steder. Til høyre er det benyttet et 10x10m rutenett for elveleiet. Til venstre, utenfor elveleiet, er det benyttet 5x5m rutenett. ....	34
Figur 28: Figuren viser hvordan bruddlinjer, markert med rødt, er plassert langs infrastrukturen og rundt bygninger. ....	34
Figur 29: Oppdelingen av områder for Manningskoeffisienter basert på arealtype.....	36
Figur 30: Oppdelingen av elvebunnen i områder brukt for kalibrering. ....	36
Figur 31 Kalibrert vannoverflate til 2011-flommen i Otta. Blå linje viser modellert høyde til vannoverflaten til 2011-flommen og røde punkter viser vannstandsmålingene som ble foretatt under flommen. ....	37
Figur 32 Kalibrert vannoverflate til 2011-flommen i Lågen-øverst. Blå linje viser modellert høyde til vannoverflaten til 2011-flommen og røde punkter viser vannstandsmålingene som ble foretatt under flommen. ....	37
Figur 33 Skadefunksjoner for infrastruktur (Tariq et al., 2021) (Tariq et al., 2014) (Kok et al., 2004) (Vanneuville et al., 2005) (Huizinga et al., 2017). ....	39

Figur 34: Konstruert skadefunksjon for vei. ....	40
Figur 35. Konstruert skadefunksjon for jernbane. ....	40
Figur 36: Figuren illustrerer hvordan banen er oppdelt i segmenter i programmet ArcGIS. ....	41
Figur 37: Figuren viser hvordan Vegvesenets verktøykasse i ArcGIS brukes for å hente ut metret vegnett.....	42
Figur 38: Figuren viser hvordan skade på infrastrukturen er beregnet i ArcGIS. ....	42
Figur 39: Viser hvordan risiko er beregnet ved å bruke beregnet skade på infrastrukturen. ....	43
Figur 40: Figuren viser hvordan hastigheter er koblet til en buffer på et jernbanesegment i ArcGIS.....	44
Figur 41: Skisse av modellen benyttet til å beregne kostander knyttet til tidsverdier og kjøretøykostnader for vei.....	46
Figur 42: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm(døgnverdier) med tilpasset kurve.....	52
Figur 43: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm(finere tidsoppløsning) med tilpasset kurve. ....	53
Figur 44: Antall overskridelser for ulike terskelvannføring for Lalm. ....	53
Figur 45: Antall overskridelser for ulike terskelvannføring for Lalm. Figuren avbilder de høyeste terskelvannføringene. ....	53
Figur 46: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm tilsig med tilpasset kurve .....	54
Figur 47: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Lalm-tilsig(døgnverdier) .....	55
Figur 48: Antall overskridelser for Lalm-tilsig(døgnverdier) for de høyere vannføringene....	55
Figur 49: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Rosten døgnverdier med tilpasset kurve .....	56
Figur 50 Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Rosten(finere tidsoppløsning) med tilpasset kurve .....	56
Figur 51: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Rosten døgnverdier.....	57
Figur 52: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Rosten døgnverdier for høyere vannføringer.....	57
Figur 53 Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Arbeidsserien døgnverdier med tilpasset kurve .....	58
Figur 54 Antall overskridelser ved ulike terskelvannføring for Arbeidsserien(døgnverdier). ....	58

Figur 55 Antall overskridelser ved ulike terskelvannføring for Arbeidsserien(døgnverdier) for høyere terskelvannføringer.....	58
Figur 56: E6 ved en 200-årsflomhendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.5» i Figur 57 .....	59
Figur 57: Lokasjon for detalj-figurer.....	60
Figur 58: Skadegrad på infrastrukturen i studieområdet ved en 200-årsflom (uten klimapåslag). .....	61
Figur 59: Skadegrad på infrastrukturen i studieområdet ved en 200-årsflom (med klimapåslag). .....	62
Figur 60: Figuren viser forventet årlig skadegrad på vei og jernbane i studieområdet. Basert på farekart som er beregnet uten klimapåslag. ....	64
Figur 61: Figuren viser forventet årlig skadegrad på vei og jernbane i studieområdet. Basert på farekart som er beregnet med klimapåslag. ....	65
Figur 62: Figuren viser forventet årlig kostnad (kr/m) som følge av direkte skader på infrastrukturen i studieområdet. Figuren er basert på flomstørrelser som har benyttet klimapåslag. ....	66
Figur 63: Hastighetskart for 200-årsflom(uten klimapåslag) med skadegrad på infrastrukturen. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.1» i Figur 57.....	68
Figur 64: Hastighetskart med registrerte maksimal hastighet innenfor en buffer som strekker seg 2 meter til hver side av jernbanen. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.1» i Figur 57 .....	68
Figur 65: Hastigheter ved 200-årsflom sammen med skadegrad. Oppe på flomsletten sør for samløpet. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.4» i Figur 57 .....	69
Figur 66: Hastighetskart med registrerte maksimal hastighet innenfor en buffer som strekker seg 2 meter til hver side av jernbanen. Oppe på flomsletten sør for samløpet. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.4» i Figur 57 .....	69
Figur 67: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 50-århendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på jernbanen som vil føre til at jernbanen stenger ved en 50-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.....	71
Figur 68: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 10-århendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på jernbanen som vil føre til at jernbanen stenger ved en 10-årshendelse. Det svake punktet er illustrert med gul fargekode. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.....	72
Figur 69: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 50-århendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 sør for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 50-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.6» i Figur 57.....	73

Figur 70: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 20-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt som vil føre til at E6 sør for samløpet stenger ved en 10-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.6» i Figur 57.....	73
Figur 71: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 200-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på Rv15 som vil føre til at veien stenger ved en 200-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.....	74
Figur 72: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 100-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på Rv15 som vil føre til at veien stenger ved en 100-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.....	75
Figur 73: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 500-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 nord for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 500-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.2» i Figur 57. ....	75
Figur 74: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 100-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 nord for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 100-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.2» i Figur 57. ....	76
Figur 75: Graf som illustrerer hvordan tidsoppløsningen påvirker modellen. ....	81
Figur 76: Skalering av 2011-flommen for Arbeidsserien. 2011-flommen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.....	84
Figur 77: Skalering av 2011-flommen for Lalm. 2011-flommen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.....	85
Figur 78: Skalering av 2011-flommen for Rosten. 2011-flommen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.....	85
Figur 79: Figuren viser et eksempel på en risikokurve. Hakkene i figuren illustrerer forskjellige returperioder. For beregning av forventet årlig kostnad er det røde arealet benyttet. Ved å benytte interpolasjon mellom returperiodene vil anslaget øke med verdi tilsvarende det grønne arealet. Maksimalt kan metoden undervurdere anslaget lik summen av det grønne og oransje området.....	92
Figur 80: Fv2600s veibane. Alternativ vei mellom Sjoa og Otta. Foto Ole Fjellstad Holt .....	99
Figur 81: Indirekte kostnader ved forskjellige scenarier knyttet til handlemønsteret til trafikantene. Figuren er basert på figurer i Siedler (2015).....	102
Figur 82: Flomvoll langs Otta. Foto Ole Fjellstad Holt. ....	106

## Tabeller

Tabell 1: Tabellen viser en oversikt over innhentet data og hvor de er hentet fra. Tabellen inkluderer ikke data for skadefunksjoner og jernbanetraffikk. ....	24
Tabell 2: Vannføring( $m^3/s$ ) for ulike returperioder. Verdiene er basert på døgnverdier og årsflommer. Tabellen er hentet fra Leine (2015). ....	28
Tabell 3: Verdiene i tabellen viser den fineste tidsoppløsningen for vannføringsserien til Lalm og Rosten. ....	28
Tabell 4: Manningskoeffisientene som er benyttet i HEC-RAS- modellen, hentet fra Chow (1959) og (Brunner, 2021). De fire nederste radene i tabellen gir de kalibrerte verdiene for elvebunnen i modellen. ....	35
Tabell 5: Vannføringer når Otta er flommende elv. Vannføringene for Otta er kulminasjonsvannføringen og vannføringene i Lågen er vannføringene når Otta kulminerer. ....	38
Tabell 6: Vannføringer når Lågen er flommende elv. Vannføringene for Lågen er kulminasjonsvannføringen og vannføringene i Otta er vannføringene når Lågen kulminerer. ....	38
Tabell 7: Meterpris for veiutbygging (Solberg, 2014). ....	43
Tabell 8: ÅDT og andel tunge kjøretøy for Rv15, E6-nord og E6-sør. Verdier hentet fra Statens Vegvesen (2022). ....	46
Tabell 9: Tidsverdier for transportmiddel. Verdier for bil og tog, verdier for tungekjøretøy. Tidsverdikostnader for bil e beregnet ut i fra reiser mellom 70 og 200km, og tog er beregnet for 200km. Justert for inflasjon og viser (2022-NOK). ....	47
Tabell 10: Kjøretøykostnader justert for inflasjon. ....	48
Tabell 11: Benyttede kostnadsformler for ulike transporttyper. ....	48
Tabell 12: Viser antall tog passeringer i Otta for ulike togtyper. ....	49
Tabell 13: Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Lalm .....	53
Tabell 14: Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Lalm tilsig .....	55
Tabell 15 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Rosten ...	57
Tabell 16 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Arbeidsserien. ....	59

Tabell 17: Forventet årlig skadegrad og forventet årlig kostnad for infrastrukturen i studieområdet, med og uten klimapåslag. ....	63
Tabell 18: Tabellen viser total kostnad for infrastrukturstrøkningene ved ulike hendelser. ..	67
Tabell 19: Stenging av infrastruktur ved ulike flomhendelser.....	70
Tabell 20: Omkjøringskostnader for hovedveiene i studieområdet.....	77
Tabell 21: Kostnad for omkjøring. ....	78
Tabell 22: Eksempel på indirekte kostnader knyttet til ulike nedetider. Kostnadsformler hentet fra Tabell 20.....	79
Tabell 23: Oppsummering av de viktigste usikkerhetsmomentene i oppgaven. ....	108

## 1 Innledning

Flommer har påvirket mennesker gjennom historien. På grunn av den flate og fruktbare jorden i flomutsatte områder, har mennesker slått seg ned i slike områder for å drive jordbruk. Dette har ført til at man har hatt behov for å forstå og kunne forutsi vannets variasjoner. Et velkjent eksempel på dette er Nilen og områdene i nær tilknytning til elven. Her har mennesker studert vannføringen fra de eldste tider (Askheim, 2021).

Elver kan ha ødeleggende følger når de flommer over sine bredder, de kan flytte jordmasser, ødelegge bebyggelse og viktig infrastruktur og ta menneskeliv. En av de mest ødeleggende flommene i nyere tid fant sted i Kina i 1931. Det er estimert at mellom 400 000 og 4 millioner mennesker mistet livet som følge av flommen (Courtney, 2018).

FNs klimapanel, IPCC, er FN-organet som har ansvar for å vurdere klima og klimaforandringer (Olerud et al., 2021). Ifølge IPCCs sjette hovedrapport vil verdens gjennomsnittstemperatur øke og føre til et endret klima (Hoegh-Guldberg et al., 2018). Dette vil ha effekter som påvirker vannføringen og flomfaren også i de norske vassdragene (Lawrence, 2016). Behovet for kunnskap om flom og dens tilhørende risiko er derfor stort.

I juli 2021 ble Tyskland og Belgia rammet av en stor flom. Den skyldtes styrtregn over et stort område (Varsom, 2021). Flere steder opplevde flom med returperiode på 500-år eller sjeldnere, og den førte til at minst 184 personer døde i Tyskland og 38 i Belgia (Kreienkamp et al., 2021). Beregninger har vist at flommen førte til skader på rundt 2 milliarder euro i kostnader på vei og jernbane (DPA International, 2021). Man regner med at sannsynligheten for værphenomenet som førte til hendelsen har steget med en faktor på mellom 1.2 og 9 ganger som følge av klimaendringene (Kreienkamp et al., 2021). Denne hendelsen, sammen med flere andre, indikerer at klimaendringer allerede har begynt å påvirke flomrisikoen i verden.

Flom påvirker infrastrukturen i Norge. Et eksempel er Gudbrandsdalsflommen som har kostet jernbanesektoren minst 380 millioner som følge av direkte og indirekte flomskader. Tilsvarende ble utgiftene på mer enn 165 millioner på veisektoren grunnet direkte skader på fylkesvei og riksvei (Siedler, 2015).

## 1.1 Oppgavens mål, relevans og oppbygning

Formålet med denne oppgaven er å gi økt kunnskap om konsekvensene som flom har på vei og jernbane, i tillegg til å bidra med innsikt i hvordan slike konsekvenser kan vurderes. Dette gjøres blant annet ved å kartlegge og analysere konsekvensene flom har på vei og jernbane i Otta. Økt kunnskap kan bidra til å begrense de uønskede flomeffektene, blant annet ved å optimere sikringstiltak. Fremtidens klima vil føre til mer ekstremvær og flommer, og oppgaven har som mål å gi kunnskap som kan brukes til å møte fremtidens klima. Oppgaven er skrevet som en del av prosjektet NordicLink, som finansieres av Nordisk Ministerråd gjennom Nordforsk. Prosjektet har som mål å øke robustheten til den nordiske infrastrukturen i forhold til ekstremvær og naturfarer.

I denne oppgaven analyser jeg de direkte og indirekte konsekvensene som flom har på vei og jernbane i Ottaområdet, der fokuset er på hovedvassdragene Otta og Gudbrandsdalslågen. Otta er en flompreget by som ligger ved samløpet av elvene Otta og Gudbrandsdalslågen. I studieområdet passerer hovedfartsårene Rv15 vestover mot Stryn, E6 mellom Oslo og Trondheim og Dovrebanen.

Oppgaven består av tre hovedelementer, analyse av gjennomsnittlig overskridelsesvarighet av ulike vannføringer, analyse av direkte konsekvenser på infrastrukturen og analyse av indirekte konsekvenser knyttet til stengt infrastruktur.

I oppgaven utvikles det en metode som finner hvor lenge ulike vannføringer i snitt vil overstige et visst flomnivå. Det vil si at man finner ut hvor lenge man kan forvente at en vannføring er oversteget når først dette nivået er nådd. Resultatet kan brukes til å finne ut hvor lenge ulike steder er oversvømt i studieområdet. Hvis for eksempel en vei blir oversvømt ved en 50-årshendelse, kan den utviklede metoden brukes til å finne ut hvor lenge man kan forvente at veien vil være oversvømt. Konsekvensene av flommer er sterkt avhengig av varigheten på flommene. Metoden vil gjøre det mulig å estimere kostnader av indirekte konsekvenser.

Direkte konsekvenser/skader forstås som ødeleggelser som skyldes direkte kontakt med vannet. Disse utgjør en viktig del av kostnadsbildet ved flom. I denne oppgaven analyser jeg etablerte skadefunksjoner, og egnetheten til disse blir drøftet. Kunnskapen denne oppgaven



oppnår om skadefunksjoner og direkte skader, vil kunne brukes som et supplement i andre studier når direkte skader skal vurderes. Dette arbeidet kartlegger direkte skade i studieområdet, og kostnadsestimatene av disse skadene kan blant annet bidra i forebyggende arbeid.

Indirekte konsekvenser er i denne oppgaven brukt som betegnelse for konsekvensene som ikke skyldes direkte kontakt med vannet, men følgene av at elementer har eller har hatt kontakt med vannet. I oppgaven beregnes kostnader knyttet til tapt tid og kjøretøykostnader som følge av omkjøring. Dette arbeidet søker å sammenfatte de tre hoveddelene på en måte som ikke er funnet i litteraturen, og som dermed kan gi ytterligere kunnskap om de indirekte konsekvensene som flom har på vei og jernbane.

Opgavens struktur og hovedmål er vist under:

1. Analyse av gjennomsnittlig overskridelsesvarighet

Det første hovedmålet i oppgaven er å lage en metode for å beregne gjennomsnittlig overskridelsesvarighet av ulike vannføringer.

2. Analyse og kartlegging av direkte konsekvenser på infrastrukturen

Opgavens andre hovedmål er å kartlegge og analysere direkte konsekvenser av flom på infrastrukturen i studieområdet. Dette hovedmålet har fire delmål:

- Kartlegge flomfare i studieområdet.
- Beregne skadegrad, risiko og kostnader som følge av flom på infrastrukturen.
- Analysere skadefunksjoner fra litteraturen og drøfte mulige forbedringer.
- Undersøke klimaendringenes effekt på de direkte konsekvensene.

3. Analyse og kartlegging av indirekte konsekvenser knyttet til stengt infrastruktur

Det tredje hovedmålet er å kartlegge og analysere konsekvensene knyttet til stengt vei og jernbane.

- Her er det nødvendig å utvikle en metode for å beregne kostnader knyttet til ekstra reisetid og til kjøretøyutgifter som oppstår når vei og jernbane må stenges i studieområdet.

## 1.2 Tidligere arbeid

Det er få studier som har gjort en direkte statistisk analyse av varighet av flom. Analyse av varigheter er ofte knyttet opp mot andre variabler. I denne oppgaven er varighet koblet til overskridelse av årsflommer ved bruk av terskelvannføring. Gervasi et al. (2021) bruker en lignende metode og bruker terskelvannføring når de undersøker hvor lenge elven har flommet over elvebredden. De Jager et al. (2012) kobler flomvarighet og vegetasjon og benytter gjennomsnittlig antall dager i året som vannstanden er over en terskel for å finne hvor lenge et punkt dekkes av flomvann.

Flere studier er utført for å kartlegge flomstørrelser og flomutbredelser i studieområdet. Drageset (2000) og Leine (2015) har utført flomberegning, og Høydal et al. (2000) og Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019) har kartlagt flomfaren i området.

Peereboom et al. (2011) utføre i 2011 en innledende risikoanalyse av flom i Norge. Forskningsprogrammet HYDRA har utført arbeid knyttet til kostnader av flom der de blant annet undersøkte skadefunksjoner knyttet til vei og jernbane (Wathne et al., 1999). NVE har et egent kost/nytte-verktøy som kan brukes til å beregne kostnader knyttet til flom. Dette er imidlertid ikke tilgjengelig for allmenheten (NVE, 2021).

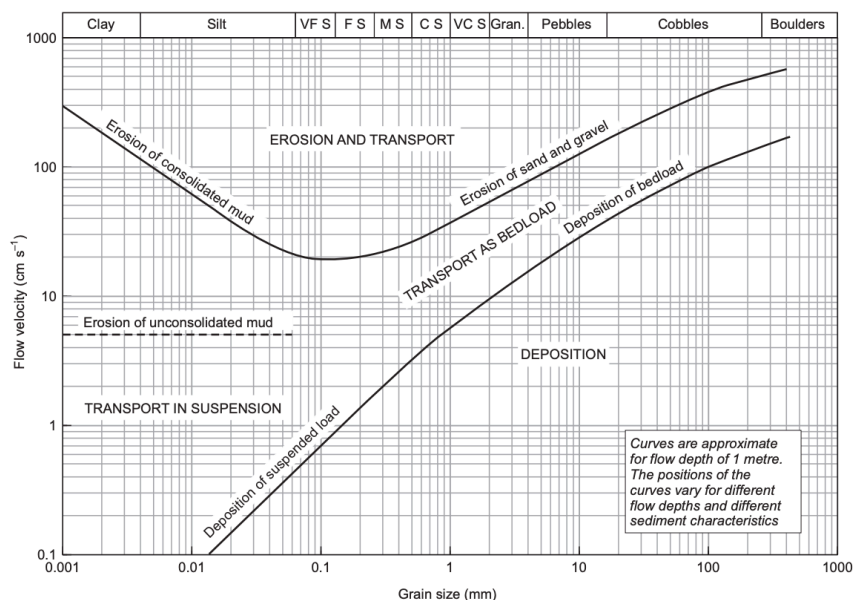
Flere studier har gjort lignende analyse som denne oppgaven for å beregne indirekte kostnader ved flom. Hallenbeck et al. (2014) har analysert indirekte kostnader på trafikanter som følge av flom i Washington, USA. Bardal (2018) har analysert tidstap som følge av dårlig fremkommelighet på fjelloverganger i Nord-Norge. Metoden i denne oppgaven skiller seg fra andre metoder ved at den ser på gjennomsnittlig varighet det svakeste punktet på infrastrukturen er dekket av vann.

## 2 Teori

### 2.1 Flom

Flom er et naturlig fenomen som forekommer når vannstanden i elver og innsjøer stiger slik at vann flommer over områder som normalt er tørre. EUs Flomdirektiv definerer flom som «en midlertidig dekking av vann over land som normalt ikke er dekket av vann» (European Parliament, 2007). Flommer kan ofte knyttes til et vassdrag, men må ikke nødvendigvis være det. Vannføringen i elvene vil variere sterkt. Ved stor nok vannføring vil ikke det naturlige elveleiet ha tilstrekkelig oppbevaringskapasitet, og det oppstår oversvømmelser (Roald, 2013).

Fysiske størrelser som beskriver en flom er; volumstrøm( $m^3/s$ ), hastighet( $m/s$ ), vannivå( $m$ ) og vannutbredelse. Oversvømte området kan kobles til arealplanlegging (Byggteknisk forskrift, 2017). Vanddybder kan blant annet kobles til skade på bygninger (Wathne et al., 1999). Hastighet kan kobles til erosjon via for eksempel Hjulstrøms diagram (Figur 1) (Nichols, 2009).



Figur 1: Hjulstrømskurve viser forholdet mellom vannets hastighet og erosjon, transport og sedimentasjon av løse partikler (Nichols, 2009).

### 2.1.1 Egenskaper og karakteristikk med flom

Det er tre faktorer som er avgjørende for om flommer oppstår og størrelsen på flommene: ny tilførsel av vann (som regel regn og/eller snøsmelting), tilstanden til nedbørsfeltet i forkant av vanntilførselen og egenskapene til nedbørsfeltet. De to første punktene er sesongavhengige. (Nied et al., 2017).

#### 1. Ny tilførsel av vann fra regn og snøsmelting.

Varigheten, intensiteten, tidsforløpet og den romlige utstrekningen er av stor betydning og påvirker flommens størrelse, volum og varighet. Ved for eksempel intens og kortvarig nedbør vil det dannes en rask og høy flomtopp (da gjerne i mindre nedbørsfelt.). Hvis nedbøren og/eller snøsmeltingen derimot er langvarig og over et større område, vil dette gi flom over et større område og over en lengre tidsperiode.

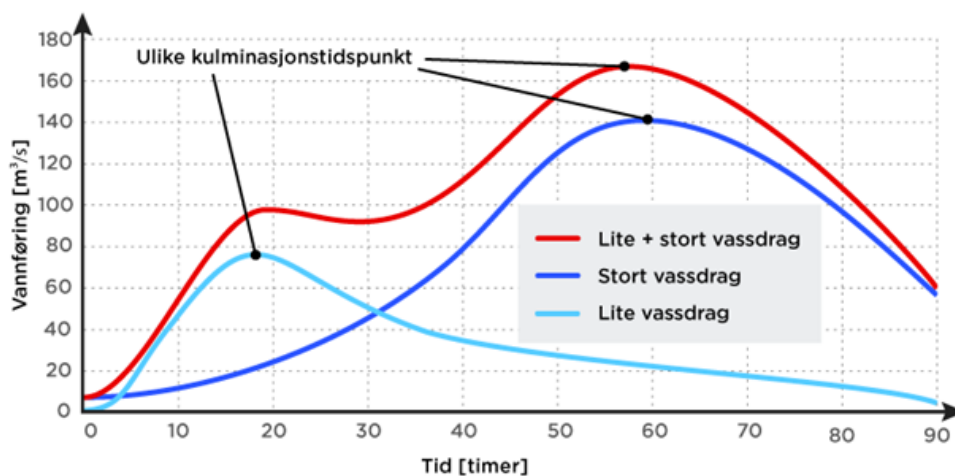
#### 2. Tilstanden til nedbørsfeltet i forkant av vanntilførselen.

Initialtilstanden til nedbørsfeltet vil avgjøre hvor stor vannføring i elvene blir. Mer snø i nedbørsfeltet vil kunne føre til høyere vanntilførsel til flommen ettersom mer smeltevann kan produseres. Her er både arealfordelingen og snøvolumet viktig. Grunnvannstand og jordfuktighet vil avgjøre hvor stor flomdempningseffekt infiltrasjon i grunnen vil ha. Vannstanden i innsjøer og reservoarer vil også ha en avgjørende rolle: er vannstanden lav, kan disse ha en dempende effekt på flom.

#### 3. Egenskapene til nedbørsfeltet.

Areal, topografi, løsmasser, vegetasjon, arealbruk, forekomst av innsjø og reguleringer har alle en stor effekt på vannføringen i vassdragene. Et stort nedbørsfelt vil det kreve regn over større områder for å generere flom. Topografien vil blant annet påvirke vannføringen til elvene ved feltets helning, jo brattere nedbørsfelt, desto raskere vil vannet dreneres. Arealbruk har betydning for hvor godt området tar opp vann. Vassdragsreguleringer har en stor effekt på vannføringen under flommer, og ofte vil vannstanden kontrolleres for å dempe de høyeste flomtoppenetoppene.

Figur 2 viser en hydrograf som gir kulminasjonen før og etter samløpet av to elver. En hydrograf viser vannføring i forhold til tid, slik at vi kan se tidsforløpet for en flom.



Figur 2: Figuren viser et eksempel på vannføringer ved samløpet av to vassdrag. Rød kurve viser vannføringen etter samløpet, og de blå for de to elvene rett før samløpet. Kulminasjonstidspunktet er forskjellig for vassdragene. Figuren er hentet fra NVE (2020b).

### 2.1.2 Klassifisering av flom

Det finnes flere måter å klassifisere flom på, der klassifiseringen avhenger av sted og formål. Merz and Blöschl (2003) har klassifisert fem typer flommer basert på erfaring fra Østerrike. Klassifikasjonen fokuserer på hva slags type nedbør og snøsmelting som danner flommene:

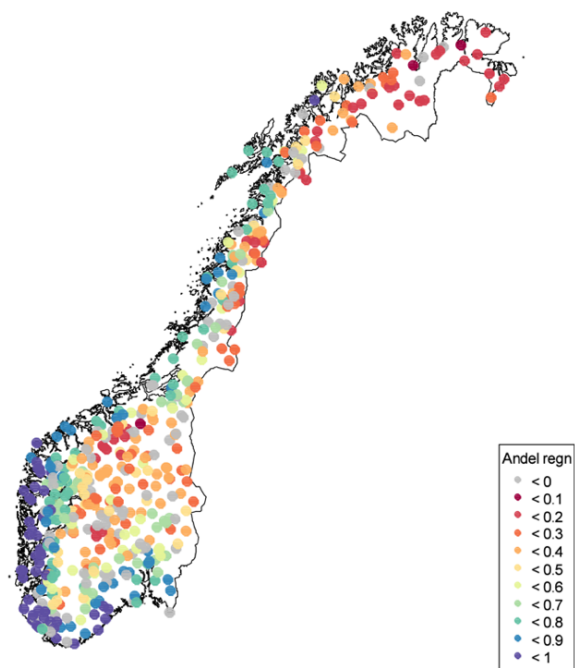
- *Langtidsregnflommer* forekommer ved store nedbørsfelt og har en varighet på flere dager til uker. Intensiteten er lav til medium. Nedbørsfeltet blir mettet, noe som igjen fører til at overflatevann akkumulerer og flommer over. Langtidsregnflommer er forårsaket av frontnedbør.
- *Korttidsregnflommer* forekommer i mindre nedbørsfelt, og disse har oftest en lokal betydning. Varigheten på nedbøren er omtrent en dag eller kortere. Intensiteten er høy og deler av feltet er mettet.
- *Styrtflom (flashfloods)* forekommer ved svært intens nedbør der vannet ikke rekker å infiltrere ned i jorden. Flommene er forårsaket av konvektiv nedbør i små nedbørsfelt.
- *Regn-på-snø flommer* forekommer ved temperaturendringer som fører til nedbør i form av regn på et snødekke. Slike flommer er vanligst i vinterhalvåret.

- *Snøsmelteflommer* forekommer når store mengder snø smelter, ofte som en følge av rask temperaturendring. Flommene kan bare forekomme der store mengder vann er lagret som snø.

Man kan også klassifisere flommer basert på hvilke områder som oversvømmes. Peereboom et al. (2011) nevner fire typer flommer som er relevant for flomrisiko i Norge; elveflom, styrtflom, urban flom og stormflo. Elveflommer vil være smelteflommer, regn-på-snø flommer, langtidsregnflommer for store felt, og kortvarig regn for mindre felt. Styrtflom kobles her til små felt med en rask økning i vannføring. Urbane flommer forekommer i urbane strøk ved intens nedbør. Byens mange harde flater, som asfalt og brostein, gjør at vannet ikke rekker eller greier å infiltrere ned i grunnen, med den følge av at overflatevannet akkumuleres og overskrider dreneringssystemets kapasitet.

En kan dele flommene i Norge basert på om de dominerende flommene kommer på våren, sommeren, høsten eller vinteren. Vår- og sommerflommene er ofte dominert av snøsmelteflommer, og viser seg som oftest som store og dominerende flommer. Høst og vinterflommene er oftest regnflommer, slike er typiske for Vestlandet (Hall & Blöschl, 2018).

Fra Figur 3 ser man at forholdet mellom regnbidrag og snøsmeltebidrag for flommer varierer i Norge. Innlandet og Finnmark er grovt sett dominert av snøsmelteflommer, mens kysten er dominert av regnflommer.



Figur 3 Andelen regnbidrag til flommene ved ulike enkeltstasjoner i Norge (Engeland, 2016).

### 2.1.3 Flomkart

#### Aktsomhetskart

NVE har laget aktsomhetskart som viser potensiell flomfare i Norge. I 2020 utviklet NVE en ny versjon av aktsomhetskart med oppløsning på 10\*10 meter. Aktsomhetskartet er basert på en metode som skal være landsdekkende og benytter derfor ikke hydrauliske beregninger. Dette gjør at kartet er grovt og gjør flere forenklinger som kan føre til feil. Aktsomhetskartet deler den potensielle flomfaren inn i tre nivåer avhengig av feltets størrelse. Flomfaren gis i maksimal vannstigning ved en 500-årsflom og den er basert på en statistisk sammenheng mellom nedbørsfeltets areal og maksimal vannstigning (NVE, 2020a).

#### Flomsonekart

NOU 1996:16 anbefalte utarbeidelse av et nasjonalt kartgrunnlag for flom, i lys av Vesleofsen i 1995 (NOU 1996: 16). Dette resulterte i digitale og detaljerte flomsonekart. Et flomsonekart viser flommers utbredelse for forskjellige returperioder basert på kulminasjonsvannstanden (Berg et al., 1996). Flomsonekartene er laget for et begrenset antall vassdrag, og kartsamlingen dekker derfor ikke alle flomutsatte steder i Norge.

## 2.2 Risiko

Risikobegrepet blir brukt i flere disipliner og dets betydning kan være forskjellig fra disiplin til disiplin (Berg-Beckhoff et al., 2017). Reisinger et al. (2020) beskriver risiko som potensialet for negative konsekvenser på menneskelige og økologiske systemer. For å kartlegge risiko kan en utføre en risikoanalyse, som vurderer ulike potensielle hendelser og deres konsekvenser. En risikoanalyse kan være kvantitativ, kvalitativ, eller en kombinasjon av disse to. En kvalitativ risikoanalyse beskriver risikoen med sitater og begreper, mens en kvantitativ risikoanalyse benytter tall og sannsynligheter (Bjørnstad, 2014).

Flomrisikoanalyse bør inneholde de økonomiske, sosiale, psykologiske, politiske og miljømessige konsekvensene av flom (Merz et al., 2010). Siden de økonomiske konsekvensene ofte blir prioritert, samt mangel på metoder som gir troverdige resultater, blir ofte bare det økonomiske aspektet tatt med i flomrisikoanalyser (Merz et al., 2010). Dette vil være tilfelle også for denne oppgaven.

### 2.2.1 Beregningsmetoder

Det finnes flere måter å beregne risiko på, en ofte brukt forenklet definisjon er

$$\text{risiko} = \text{sannsynlighet} * \text{konsekvens} \quad \text{Ligning 1}$$

Ser man for eksempel på en 200-årsflom vil denne ha større konsekvenser enn en 10-årsflom. Samtidig er sannsynligheten for at en 200-årsflom skal forekomme lavere og risikoen er derfor ikke nødvendigvis større ved en 200-årsflom. I denne oppgaven er beregnes risiko ut fra forventet årlig kostnad. Forventet årlig kostnad gir den gjennomsnittlige kostnaden beregnet for hvert år når man ser over en lengre tidsperiode, og dette er den mest brukte parameteren for å måle flomrisiko (Foudi et al., 2015).

Tre elementer må være til stede for at en skal ha flomrisiko; fare, utsatte elementer og sårbarhet (Figur 4). Fare er sannsynligheten for det fysiske fenomenet(flom), utsatte elementer er de elementene som blir truffet av faren, og sårbarheten angir hvordan faren påvirker de utsatte elementene.



Figur 4: Fare og sårbare- og utsatte elementer skaper en risiko. Hentet fra (SDEA, u.å.) og modifisert.

### 2.2.2 Fare

EU-prosjektet Safeland(2010) definerer fare som et fenomen som har potensialet til å skape uønskede konsekvenser, som for eksempel en flom (Corominas & Mavrouli, 2010). En fare kan være teknologisk, et naturlig fenomen eller en kombinasjon av disse (Schmidt-Thomé & Kallio, 2006). Flommer forårsaket av naturlige fenomener som nedbør og varme er naturlige farer. Mens flommer som er skapt av demningsbrudd er i større grad en teknologisk fare. Fare er representert i risikoanalysen ved den årlige overskridelsessannsynligheten, som en kan finne i aktsomhetskart og flomsonekart.

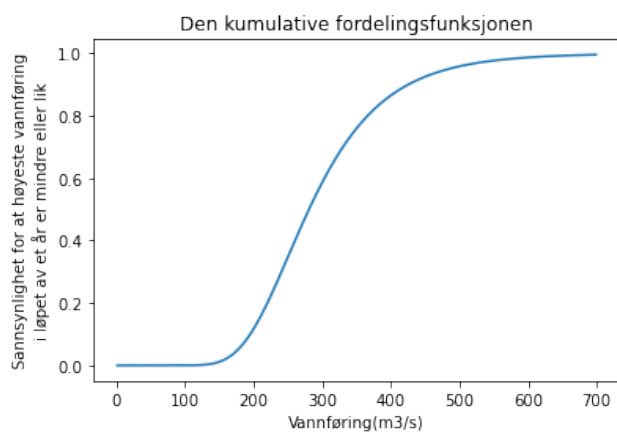


En kan definere flom ut fra en statistisk returperiode (Tollan, 2020). Returperiode, T, er et statistisk begrep som viser gjennomsnittlig tidsperiode mellom hver gang en gitt verdi overstiges. Den årlige overskridelsessannsynligheten, G, gir sannsynligheten for at en flom med en gitt størrelse, x, skal overstiges et år. Returperioden finner en fra den årlige overskridelsessannsynligheten ved  $T = 1/G$ . Har en flom en returperiode på 100 år, vil det si at den årlige sannsynligheten for at en flom som overstiger den gitte verdien skal forekomme er 0,01.

For å finne G og T benyttes den kumulative fordelingsfunksjonen, F (Engeland, 2021). Figur 5 viser et eksempel på en kumulativ fordelingsfunksjon. Her er flommenes størrelse som er funnet ved frekvensanalyser plottet langs x-aksen. På y-aksen er sannsynligheten for at høyeste vannføring i løpet av et år er mindre eller lik en spesifikk flomstørrelse.

Returperiode kan dermed bestemmes ut fra:

$$T(x) = \frac{1}{G(x)} = 1/(1 - F(x)) \quad \text{Ligning 2}$$

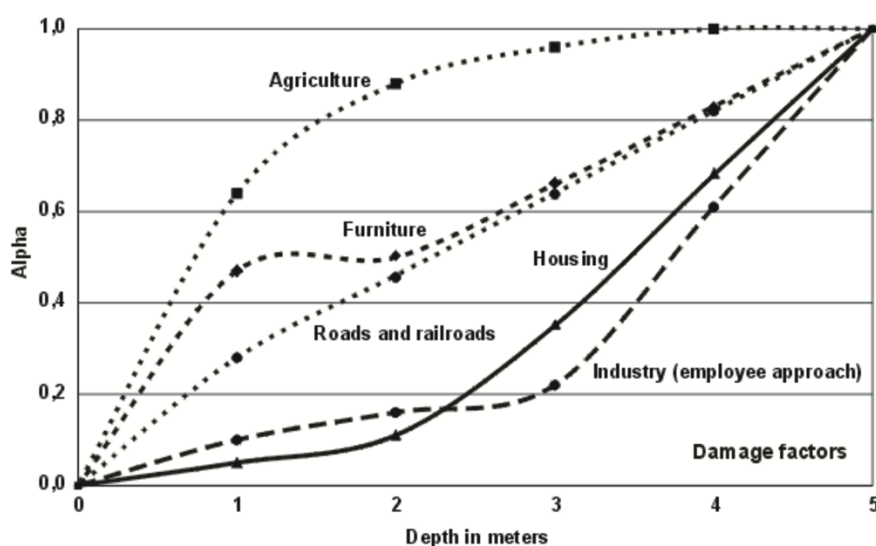


Figur 5. Eksempel på en kumulativ fordelingsfunksjon for vannføringer.

### 2.2.3 Sårbarhet

Sårbarhet kan tolkes som svakheter i et system som begrenser evnen til å motstå uønskede konsekvenser (NOU 2006: 6). Sårbarhet kan presenteres med verdier fra 0 til 1. Verdiene angir hvor stort tap gitt i andel av et element som vil forkomme som følge av et fenomen, der 0 ikke fører til noen skader, mens 1 fører til total ødeleggelse. (Nadim, 2005).

For å finne sårbarhet fra vannskader kan en skadefunksjon benyttes. En skadefunksjon gir graden av skade mot en gitt parameter, for eksempel vanndybde. Det er to hovedmåter å konstruere skadefunksjonene, empirisk og syntetisk (Merz et al., 2010). Ved empirisk metode bruker man skadedata fra flommer, mens den syntetiske metoden prøver å anta hvilke skade en kan forvente. Det er også mulig å kombinere disse metodene (Merz et al., 2010). Figur 6 viser eksempler på skadefunksjoner for ulike elementer.



Figur 6: Ulike skadefunksjoner. y-aksen viser skade i andel av maksimal skade, x-aksen viser vanndybden (Vanneuille et al., 2005).

### 2.2.4 Utsatte elementer

Utsatte elementer er elementene som blir berørt av en gitt fare. Utsatte elementer representeres i risikoanalyse ved verdien 0 eller 1, 0 hvis elementet ikke er berørt av faren, og 1 hvis elementet er berørt.

## 2.3 Konsekvenser

En kan dele konsekvensene av flom i to deler, direkte og indirekte konsekvenser. Direkte konsekvenser er følgene som primært forårsakes av faren (Arrighi et al., 2021; Hallegatte, 2015). Som vannskader i hus, erosjonsskader på veien og ødelagte avlinger. De indirekte konsekvensene er ikke forårsaket av direkte kontakt med vannet, men følgene av at elementer har eller har hatt kontakt med vann. Eksempler på indirekte konsekvenser er lavere fremkommelighet på vei og jernbane og lavere aktivitet i området som rammes. De direkte konsekvensene vil dekke et relativt lite område og et kort tidsrom, mens de indirekte dekker et større område over et større tidsrom (Hallegatte, 2015). Det er mer komplisert å beregne kostnadene av de indirekte skadene som kan ha et tidsintervall på flere år etter en flom (Merz et al., 2010).

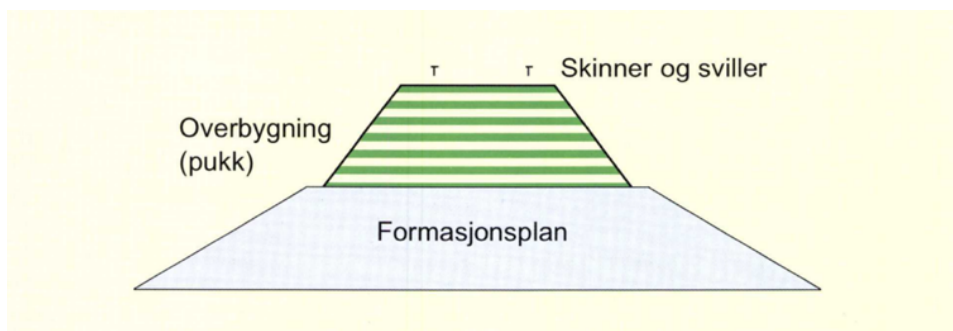
Man kan dele skadene inn i skader som er lette og skader som er vanskelige å kostnadsberegne (Merz et al., 2010). Direkte skade på infrastruktur er et eksempel på kostnader som er relativt lett å kostnadsberegne. Mens konsekvenser som følge av mental belastning og ødeleggelse av miljøet, er eksempler på følger som det er vanskelig å kostnadsberegne.

Flomskadeanalyser kan deles inn i forskjellige nivåer; mikroskala, mesoskala og makroskala. Ved mikroskala skiller en ut ulike objekter og analyserer disse spesifikt, som for eksempel vei- og jernbanesegmenter. I mesoskala benytter man en samling av flere objekter over et større område. Makroskala analyserer store enheter som for eksempel regioner. (Merz et al., 2010).

## 2.4 Flomskader på infrastruktur

For å få oversikt over flomskadene som oppstår på infrastrukturen, må se på de ulike delene av strukturen og i hvilken grad disse blir påvirket av flommen. Forskningsprogrammet HYDRA ønsket å lage standardiserte kostnadsfunksjoner med fokus på hovedvassdrag fra skadedata tilknyttet flommen i 1995 for vei og jernbane (Wathne et al., 1999). Her inndeler Wathne et al. (1999) flomskadene på jernbanen ut fra hvor høyt vannet nådde opp på jernbanekonstruksjonen:

- Når vannstanden ikke når opp til formasjonsplanet vil det ikke medføre skade (Figur 7).
- Hvis vannet ikke når høyere enn til formasjonsplanet, vil eneste kostnad være knyttet til opprensing av stikkrenner.
- Ved vannstand opp i pukklaget kan det være nødvendig å pakke dette (Wathne et al., 1999). Geir Vatne i Bane NOR bekrefter at dette av og til vil måtte være nødvendig (personlig kommunikasjon, 15. desember 2022).
- Hvis vannet dekker svillene, og vannstanden holder seg slik i over ett døgn, fører avsetninger til at banen må renses. Vatne (personlig kommunikasjon, 15. desember 2022) bekrefter at balastlaget kan bli forurenset når vann tar med seg finstoff inn i denne og dermed gi økt behov for vedlikehold.



Figur 7: Figuren viser et tverrsnitt av en standard jernbane (Wathne et al., 1999)

HYDRA utviklet grove skadefunksjoner som tar til høyde for form og oppbygning til jernbanen. Skadefunksjonene er påvirket av at skader til sideelver er kommet med i datagrunnlaget fra 1995 flommen. Funksjonene gir en indikasjon på hvilke skader man kan forvente, og er derfor inkludert under(NOK-2022):

- 52 951 kr per km der vannstanden når formasjonsplanet
- Minimum 79 426 kr per km i tilleggskostnad for der vannstanden når inn i pukklaget og det ikke forventes tilslamming eller erosjon.
- Maksimum 441 258 kr per km i tilleggskostnad hvis vannstanden når opp i pukklaget og det er fare for erosjon og eller tilslamming.

Wathne et al. (1999) skriver at de direkte skadene på vei forekommer som setnings-skader og utvaskinger, og setnings-skadene oppstår når grunnvannet når en viss høyde i bærelaget under veidekket. Setnings-skadene er avhengig av varigheten på flommen og forverres ved lengre varighet (Wathne et al., 1999). Wathne et al. (1999) skriver at veier som ligger lavt i forhold til elven, ofte har plastring mot elven for å motvirke skader. Grunnet begrenset datagrunnlag i Hydra, ble det konstruert en forenklet skadefunksjon som gir en kostnad på 635 412 kr per km der vannstanden når opp til veidekket.

Figur 8 og Figur 9 viser eksempel på flomskader. Ved vannstand opp i overbygningen (pukklaget) er fare for erosjon (Figur 8). Vatne (personlig kommunikasjon, 15. desember 2022) sier at sidevassdrag som passerer banen i kulverter, utgjør et klart større problem for jernbanen enn hovedvassdraget. Figur 9 viser et eksempel på skade fra sideelv.

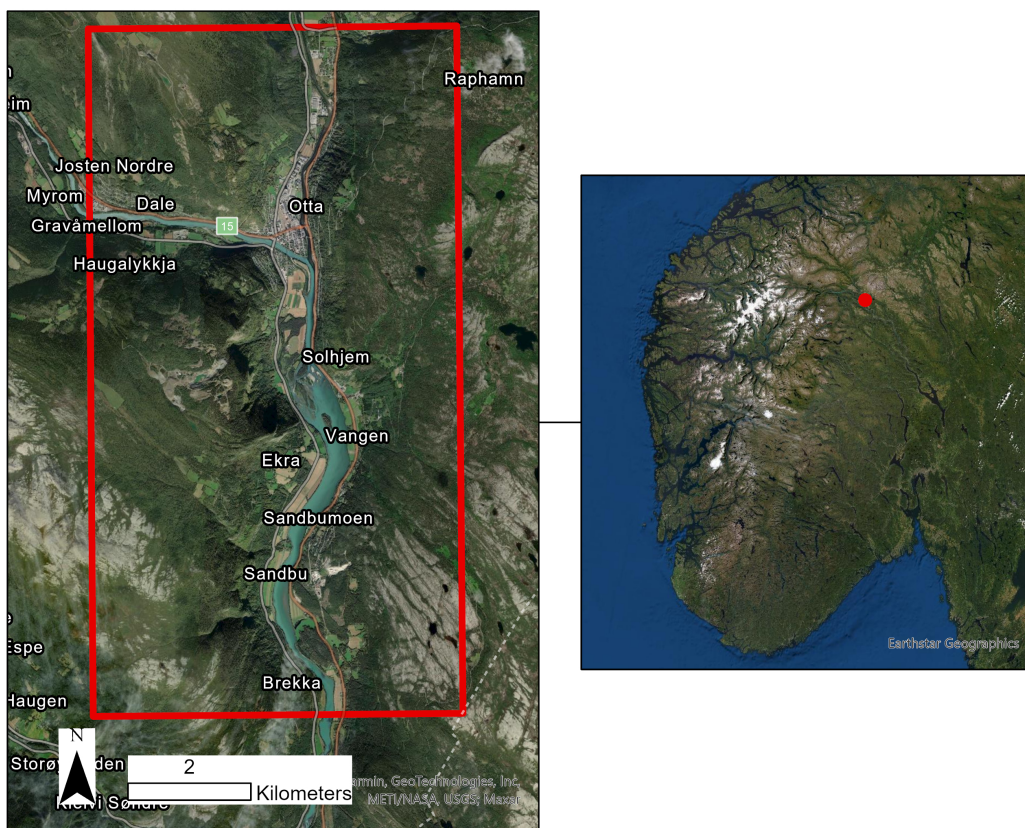


Figur 8: Erosjon på bane i Gudbrandsdalen som følge av flommen i 2011. (Jernbaneverket, u.å.).



Figur 9: Erosjon på bane som følge av flom i sideelv under flommen i 2011 i Gudbrandsdalen. Det er fare for skade på det elektriske anlegget som ligger i betongkanalen til høyre i bildet. (Jernbaneverket, u.å.).

### 3 Områdebeskrivelse

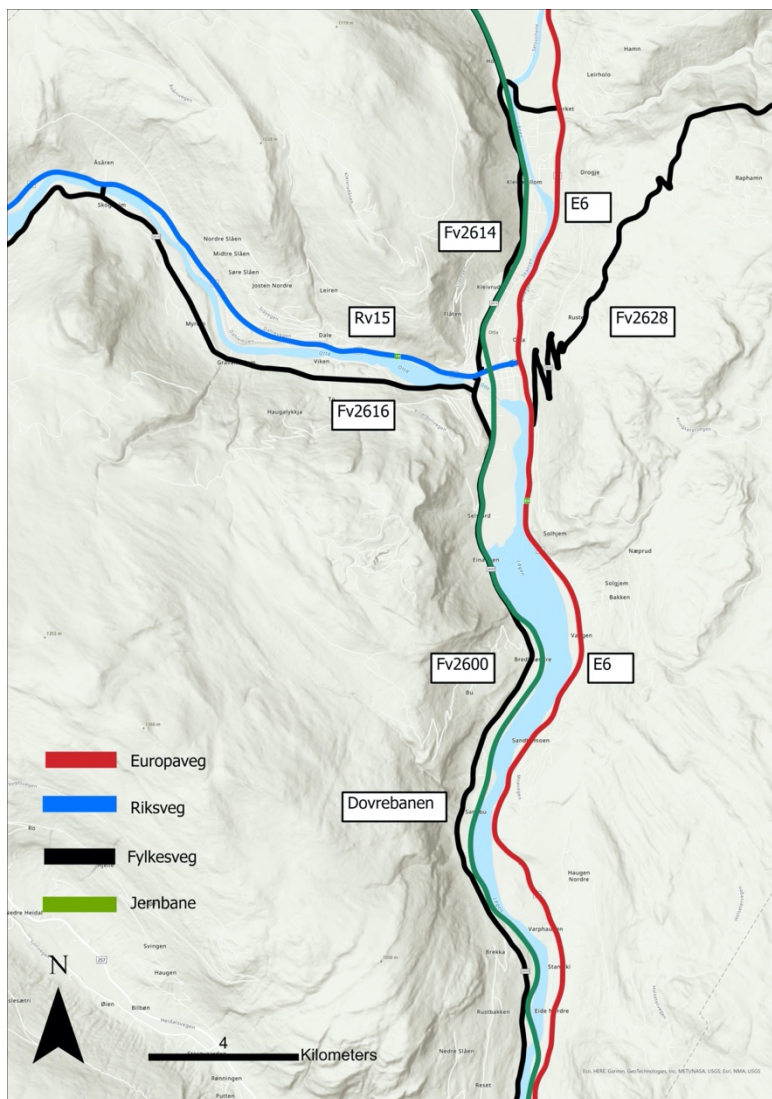


Figur 10 Studieområdet er innenfor den røde rammen på bildet til venstre, mens lokaliseringen i Sør-Norge er vist med rød prikk på kartet til høyre.

#### 3.1 Studieområdet

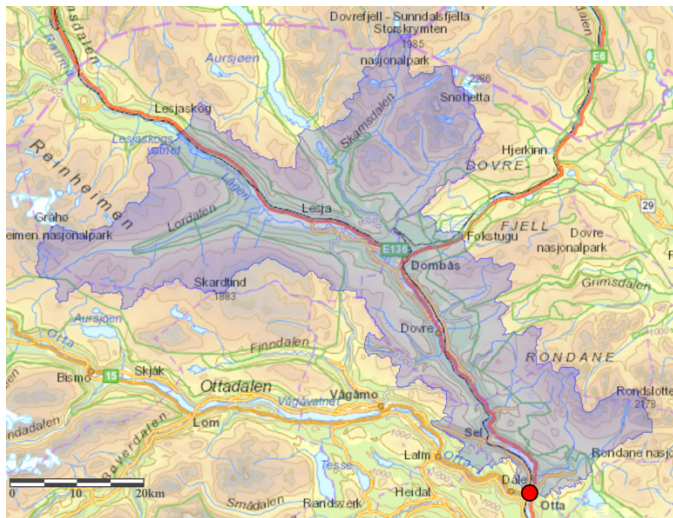
Oppgavens undersøkte område, heretter omtalt som studieområdet (Figur 10), ligger i Sel kommune. Her ligger de to store elvene Otta og Gudbrandsdalslågen, heretter kalt Lågen. Elvene møtes i byen Otta, se Figur 10. Otta har et areal på 2,13 km<sup>2</sup> og en befolkning på 2283(2021) (SSB, 2021a). Byen ligger i Innlandet fylke og er administrasjonssenter for Sel kommune. Den er et service-, handels- og skolesenter i Nord-Gudbrandsdalen (Thorsnæs & Mæhlum, 2021). I Otta finnes det blant annet næringsmiddelindustri, trevareindustri, grafisk industri og steinindustri (Thorsnæs & Mæhlum, 2021).

I studieområdet finnes det viktig infrastruktur (Figur 11): Rv15 starter i Otta og går vestover. Veien er en viktig transportåre som kobler Sunnmøre med Østlandet. Både E6 mellom Oslo og Trondheim, og Dovrebanen passerer studieområdet. Oppgaven har fokuset på de største transportsårene i studieområdet; Dovrebanen, E6 og Rv15. Infrastrukturstrekingene som er analyserte i studieområder har følgende lengder: E6 10695m, Rv15 3545m og Dovrebanen 10545m. Fylkesveinavnene i Figur 11 endret navn ved den nye fylkesinndelingen, Fv418, Fv435, Fv436 og Fv444 ble endret til henholdsvis Fv2600, Fv2614, Fv2616 og Fv2628.



Figur 11: Infrastruktur i studieområdet. Fv2628 går opp på fjellet og har derfor ikke noe gjennomfartstrafikk.

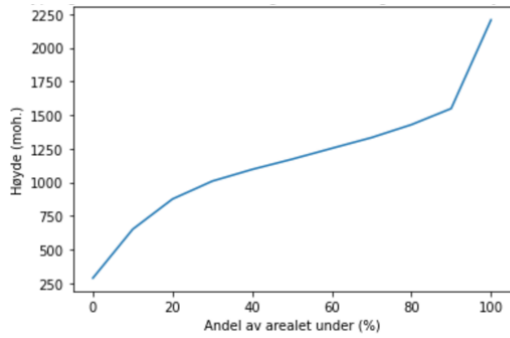
### 3.2 Gudbrandsdalslågen



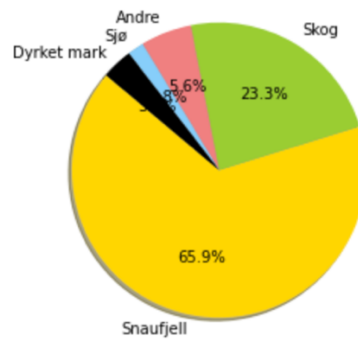
Figur 12: Nedbørsfeltet til Lågen er merket blått. Byen Otta er markert med rødt punkt. (NEVINA).

Lågen renner igjennom tettstedet Otta og studieområdet. Nedbørsfeltet for Lågen nord for Samløpet ved byen Otta er illustrert i Figur 12. Feltet har et areal på 2101 km<sup>2</sup> og preges av innlandsklima med total sommernedbør (mai - september) på 303mm, og total vinternedbør (oktober – april) på 320mm (NEVINA). Gjennomsnittlig sommertemperatur er 4.9 C°. Den gjennomsnittlige vintertemperatur er -6.7 C° slik at snø akkumuleres om vinteren før den smelter og ofte fører til snøsmelteflommer (NEVINA). Den hypsografiske kurven (Figur 13) viser at selv om høydeforskjellene er store i feltet, ligger en stor del av feltet høyt mellom 1100 og 1600 moh. Dette fører til at snøen i område vil smelte relativt samtidig, noe som kan føre til flom. Arealfordelingsdiagrammet (Figur 14), viser at 65.9% av feltet er snaufjell, noe som fører til rask avrenning. Sjøprosenten til feltet er 1.8%, dette gir liten demping av flommer. Feltet ble i 2018 regulert ved åpningen av Rosten kraftverk (Glommens og Laagens Brukereieforening, u.å.).

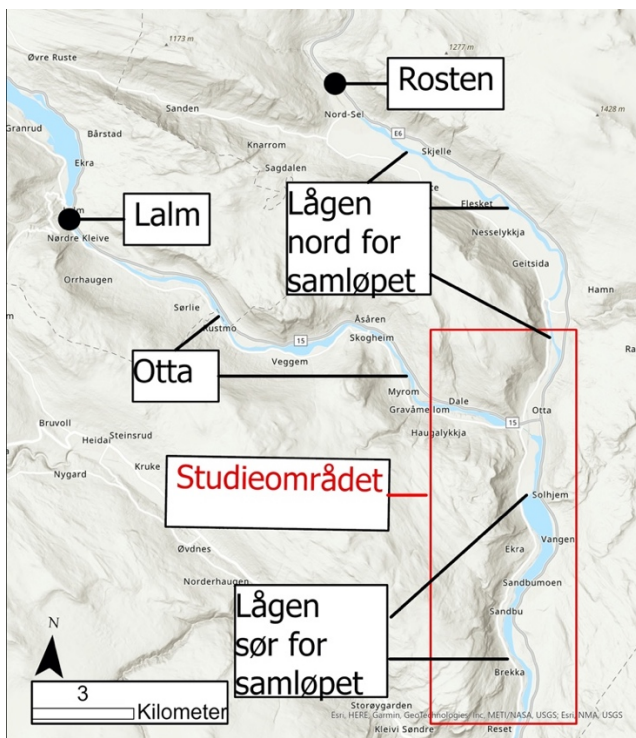




Figur 13: Hypsografisk kurve for dreneringsnett til Lågen nord for byen Otta. (NEVINA).

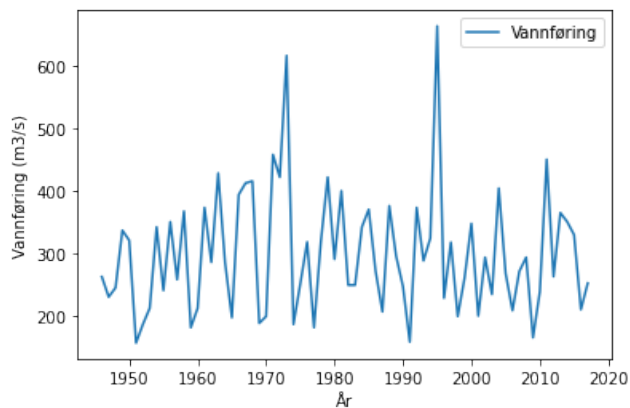


Figur 14: Arealfordeling til dreneringsnett til Lågen nord for byen Otta (NEVINA).

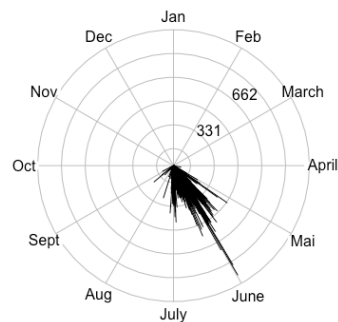


Figur 15: Figuren viser plasseringen til de hydrologiske stasjonene Rosten og Lalm i forhold til studieområdet.

Den hydrologiske stasjonen Rosten, nr. 2.614, ligger 14 km oppstrøms i Lågen for byen Otta (Figur 15). Stasjonen er her valgt for å gi den beste representasjonen av vannføringen Lågen har i studieområdet. Stasjonen regnes for å ha en middels god vannføringskurve (Høydal et al., 2002). Den største vannføringen for hvert år er vist i Figur 16. Fra flomdiagrammet (Figur 17) ser vi at Lågen er dominert av smelteflommer rundt månedsskiftet mai og juni.

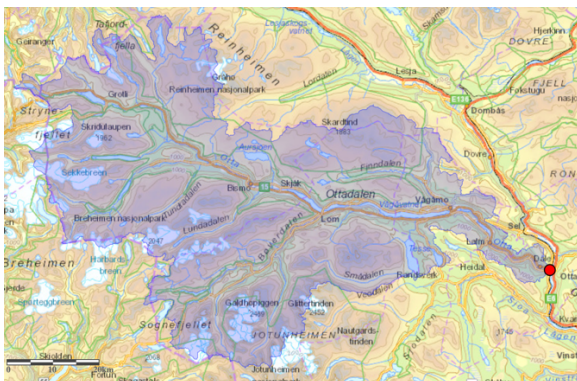


Figur 16: Figuren viser den største daglige vannføringen som er registrert ved Rosten i de ulike årene.



Figur 17: Diagrammet viser når på året den årlige maksimale flommen har forekommet ved Rosten. Styrken på flommen er illustrert ut fra sentrum av figuren .

### 3.3 Ottaelven

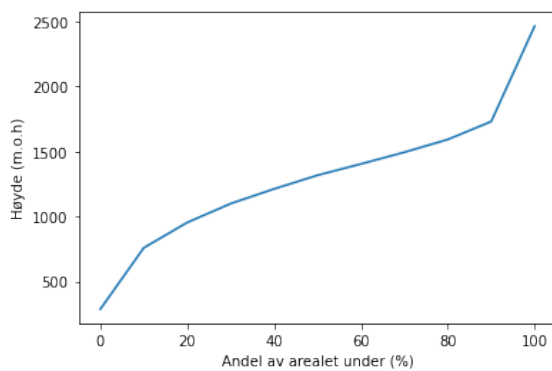


Figur 18: Nedbørsfeltet til elven Otta, merket blått. Byen Otta er markert med et rødt punkt. (NEVINA)

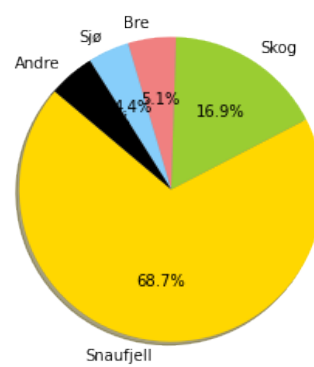
Elven Otta renner ut i Gudbrandsdalslågen ved byen Otta. Nedbørsfeltet (Figur 18) ligger høyt oppe, med 75% over 1025.5 moh. Feltets høyeste punkt er Galdhøpiggen med sine 2469 moh. Den høye beliggenheten medfører lave temperaturer der den gjennomsnittlige vintertemperaturen (oktober-april) er  $-6,5\text{ C}^\circ$  og den gjennomsnittlige sommertemperaturen er  $4.1\text{ grader}$ . Gjennomsnittlig vinter- og sommersnedbør er henholdsvis 533mm og 379mm. Den kalde vinteren gjør at store mengder snø samler seg opp igjennom vinteren og fører til snømelteflommer om våren og sommeren. Den hypsografiske kurven (Figur 19) viser at

nedbørsfeltet har store høydeforskjeller, samtidig som at store deler av feltet befinner seg mellom 1100 og 1700 moh. Fra arealfordelingsdiagrammet, Figur 20, ser vi at 68,7% av feltet består av snaufjell. Dette fører til rask avrenning. Bare 4.4% av feltet består av sjø, noe som resulterer i lav flomdempning. (NEVINA).

Otta er regulert med fire reguleringsmagasin, Breiddalsvatn, Rauddalsvatn, Aursjøen og Tesse (Drageset, 2000). Elvens regulering vil virke flomdempende, men Drageset (2000) angir at reguleringene har mindre innvirkning på flombildet.

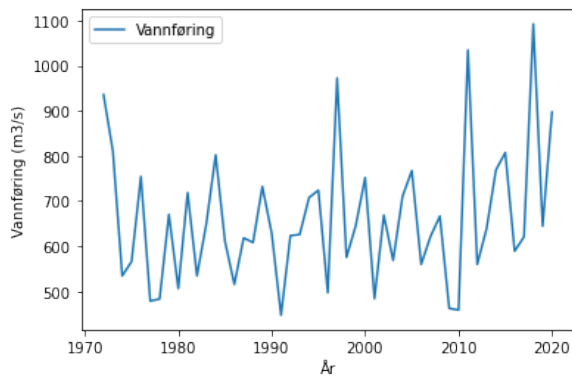


Figur 19: Hypsografisk kurve for Otta (NEVINA).

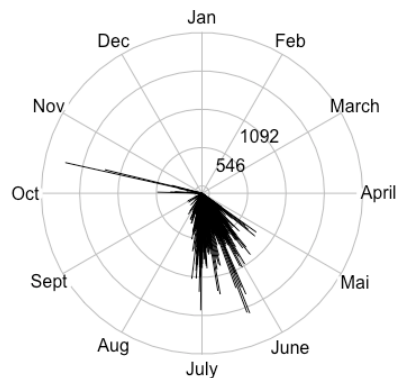


Figur 20: Arealfordelingen til Otta nedbørsfelt(NEVINA)..

Den hydrologiske stasjonen Lalm ligger nord for byen Otta (Figur 15). Lalm ligger 16km opp i Otta fra tettstedet Otta (Figur 15). Stasjonen ligger relativt nær tettstedet Otta og gir derfor en god beskrivelse av flommene i området rundt byen, studieområdet. Lalm ansees av Høydal et al. (2000) å ha en meget god vannføringskurve og dataserie. Figur 21 viser den årlige maksimale vannføringen ved stasjonen for hvert år. Otta domineres av vårflokker (Høydal et al., 2000). Fra Figur 22 ser vi at de fleste flommene forekommer i slutten av mai, juni og starten av juli. Høstflokker forekommer også, og høstflommen i 2018 hadde den største vannføringen gjennom perioden 1972-2022 (Figur 21).



Figur 21: Den maksimale årlige vannføringen ved Lalm.



Figur 22: Diagrammet viser når på året de fem prosent høyeste daglige vannføringene i perioden 1972-2022 har forekommet ved Lalm.

### 3.4 Flommer i studieområdet de siste årene

#### 1995 Flommen - Vesleofsen

Flommen i juni i 1995 skyldes store nedbørsmengder og rask temperaturstigning som resulterte i stor snøsmelting. Dette ble forsterket av at det på våren lå 20% mer snø enn vanlig i fjellet og svært lave temperaturen som førte sen snøsmelting (Brox, 1995). For Lågen betegnes flommen som ekstrem, mens Otta som ikke ble rammet like hardt, fikk stor flom (Høydal et al., 2000). Totalkostnad for skadene til flommen var 1,8 milliarder NOK (1995-verdi) (Roald, 2013).

#### 2011 Flommen

I juni 2011 oppsto det flom som følge av intens nedbør og høy temperatur som førte til snøsmelting i Fjellet (Kleivane, 2011). Hendelsen førte til stenging av E6 flere steder i Gudbrandsdalen (Svensbakken, 2012). Otta hadde en flom tilsvarende en returperiode på over 100 år, mens flommen i Lågen hadde en returperiode på ca. 100 år (Kleivane, 2011).

## 2013 Flommen

Vinteren 2012/2013 var kald. Bortsett fra i enkelte fjellområder var det lite snø. 22. mai kom en værtype lik den som skapte flommen i 2011, med regnvær fra sørøst. Kombinasjonen av snøsmelting og regn førte til flom i Gudbrandsdalslågen (Roald, 2013). Flommen hadde en returperiode på 2-3 år i Ottaelven og 50-100 år ved Losna sør for Otta i Gudbrandsdalslågen (Roald, 2015).

Flommen rammet E6 og Dovrebanen 22. mai 2013. Som følge av hendelsen var Dovrebanen stengt i 26 dager. Kostnader på Jernbanesektoren var over 380.7 millioner 2013-kroner. For veisektoren ble kostnaden på over 165 millioner kroner, dette kun gjenoppbygningskostnader. Kommunal infrastruktur hadde skader for minst 136.7 millioner. (Siedler, 2015).

## 2018 Flommen

I oktober 2018 opplevde studieområdet en stor flom. Flommen rammet Vestlandet og Otta-vassdraget hardt. Det ble registrert gjentagsintervall i Otta-vassdraget på over 50 år (NVE, 2020c). Selv om flommen forekom på høsten, var dette en snøsmelteflom (NVE, 2020c), der et tidlig snøfall ble etterfulgt av høye temperaturer (Fylkesmannen i Innlandet, 2019).

## 4 Metode

Dette kapittelet er delt inn i tre deler. Den første delen fokuserer på varighet, den andre delen fokuserer på å utvikle farekart og analysere direkte konsekvenser, den tredje delen omhandler indirekte konsekvenser.

Jeg har valgt å plassere dataene hentet fra eksterne kilder, i dette kapittelet. Dette er gjort for å gi en ryddigere oversikt over dataene og bedre forståelse for metodevalget i oppgaven. Innhentede data er oppsummert i Tabell 1.

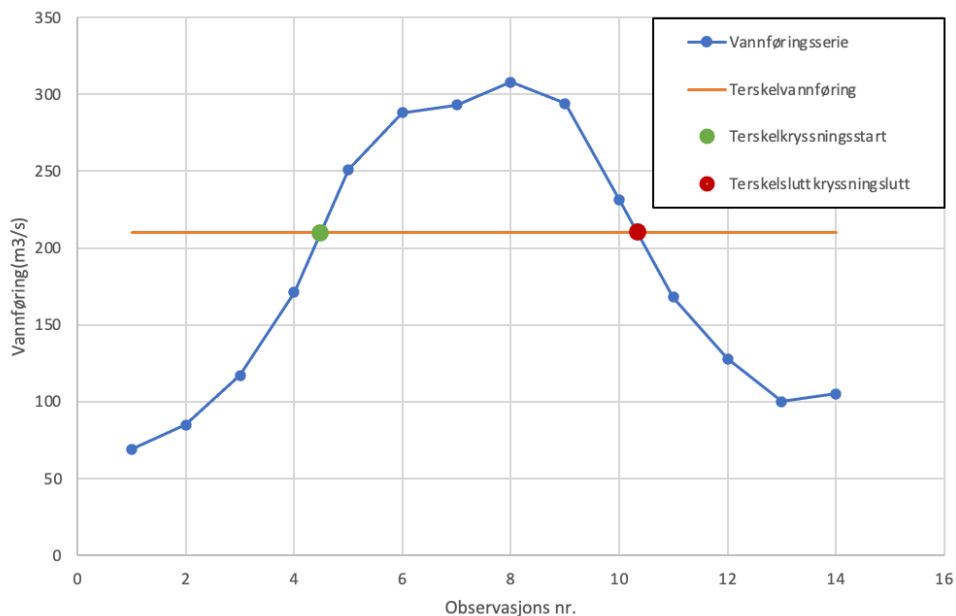
*Tabell 1: Tabellen viser en oversikt over innhentet data og hvor de er hentet fra. Tabellen inkluderer ikke data for skadefunksjoner og jernbanetraffikk.*

Data	Kilder
Vannføringsserier for Rosten og Lalm	(Sildre, 2022)
Vannføringsserie for Lalm tilsig	(K. Engeland, personlig kommunikasjon, 18. mars 2022)
Kulminasjonsvannføringer benyttet i HEC-RAS	(Leine, 2015)
Terrengdata	(Kartverket, 2022), (Sund, 2016)
Bygningsdata	(Geovekst, 2022)
Manningskoeffisienter	(Chow, 1959), (Brunner, 2021)
Vannstandsmålinger for kalibrering	(Dr. Øverland, Personlig kommunikasjon, 3. mars 2022)
Tidsverdier og Kjøretøykostnader	(Statens Vegvesen, 2021)
Metrert vegnett	(Statens Vegvesen, 2017)
Jernbanedata	(Geovekst, 2022)
Meterpris for veg	(Solberg, 2014)
Meterpris for jernbane	(Samferdseldepartementet, 2006)
ÅDT og andel tunge kjøretøy tilknyttet vegnettet	(Statens Vegvesen, 2022)

## 4.1 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet

I oppgaven er det beregnet gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for ulike terskelvannføringer. Vannføringsdata er hentet fra de hydrologiske stasjonene Lalm(2.25.0) og Rosten(2.614.0), og er lastet ned fra NVEs tjeneste Sildre (Sildre, 2022). I tillegg til vannføringsserier for Rosten og Lalm, er Lalm tilsigserie benyttet. Serien er gitt av K. Engeland (personlig kommunikasjon, 18. mars 2022) og gir en tilnærming til hvordan vannføringen ville vært uten reguleringer. Det er også konstruert og benyttet en arbeidsserie for vannføringen etter samløpet ved Otta, videre omtalt som Arbeidsserien. Arbeidsserien stammer fra Leine (2015) og er gitt ved  $Q_{\text{Arbeidsserien}} = (Q_{2.25.0} * 1,01) + (Q_{2.614.0} * 1,064)$ , der 1,01 og 1,064 er skalering som følge av restfelt. Man kan anta at forholdet mellom vannføring ved stasjonene for de to elvene er lik ved samløpet i Otta (Leine, 2015).

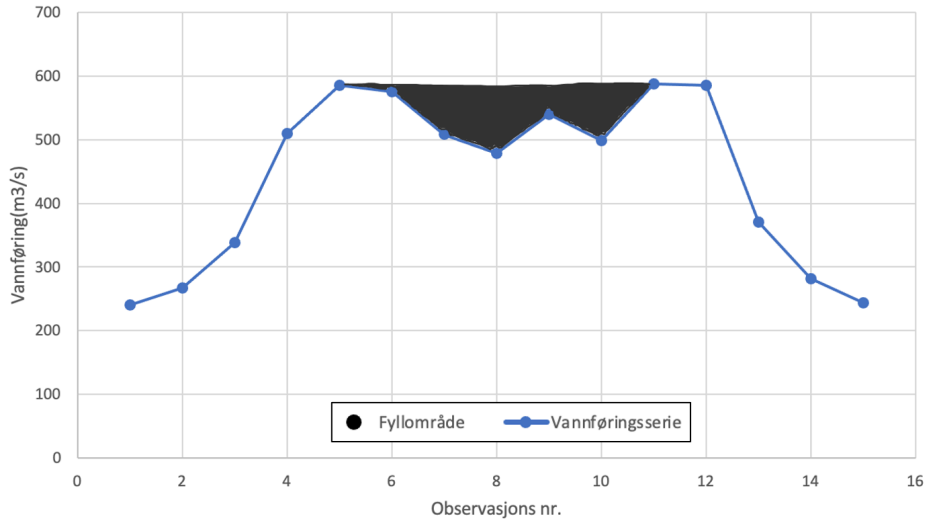
Vannføringsseriene er analysert i R. En algoritme er konstruert for å finne hvor lenge i gjennomsnitt forskjellige terskelvannføringer er oversteget. Algoritmen er lagt til som i vedlegg. I Figur 23 ser en et eksempel på en overskridelse. Terskelvannføringen i eksempelet er  $210 \text{ m}^3/\text{s}$ . Terskelen krysses mellom observasjon 4 og 5. Det interpoleres for å finne tidspunkt for krysning. Terskelen krysses igjen mellom observasjon 10 og 11. Varigheten mellom terskelkrysningsstart og terskelkrysningslutt gir varigheten på terskeloverstigelsen. For hver terskelvannføring er midlere varighet av overskridelsene beregnet.



Figur 23: Figuren viser en overskridelse, hvor flomtoppen/flombølgen er høyere enn terskelvannføringen. Grønt punkt gir overskridelsens startpunkt og rødt punkt gir slutt punktet.

For å unngå at en flom med flere toppe registreres som to eller flere ulike flommer, er en algoritme for å slå sammen flomtopper konstruert og benyttet. Algoritmen tar inn et minimumtidsintervall og slår sammen flomtoppene hvis tidsintervallet mellom slutten på en overskridelse og starten på en annen er under det definerte minimums-tidsintervallet. Figur 24 viser et eksempel der overskridelser er slått sammen. I dette tilfellet er varigheten mellom observasjon 9 og 11 under minimumtidsintervallet. Flomtoppen i eksempelet vil derfor bli registrert som at vannføringen mellom observasjon 9 og 11 er konstant lik som i observasjon lik 9 og 11. I dette eksemplet hadde tilfeldigvis toppene ved observasjon 9 og 11 samme vannføring. Algoritmen gjør at hydrografen heves med fyllområdet i Figur 24. Algoritmen fjerner den tillagte tiden, slik at det ikke registreres ekstra tid.





Figur 24: Illustrasjon av hvordan algoritmen slår sammen to flomtopper.

Den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten for hver terskelvannføring er deretter plottet mot terskelvannføringen. Det er også konstruert plott for antall overskridelser som er registrert for hver terskelvannføring mot terskelvannføringen. En kurve er så konstruert for å finne sammenhengen mellom den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten og terskelvannføringen. Dette er gjort ved å tilpasse en kurve kvantitativt for å gi en best mulig representasjon. De ulike returperiodene fra Tabell 2 er dermed benyttet for å finne den gjennomsnittlige varigheten av overskridelser ved de ulike årsflommene.

Vannføringen som er brukt for å beregne returperiodene i Tabell 2 er døgnmiddelvannføring. Stasjonene Lalm og Rosten inneholder finere tidsoppløsning en døgnverdier (Tabell 3). Det er derfor ønskelig og nyttig å benytte denne ekstra oppløsningen, og R-scriptet er kjørt for vannføring med finere tidsoppløsning. Den finere tidsoppløsningen kan ikke kobles til Tabell 2, siden denne er basert på døgnverdier. Resultatene fra den finere oppløsningen kan derimot benyttes for å tolke resultatet fra døgnverdiene.

Tabell 2: Vannføring(m<sup>3</sup>/s) for ulike returperioder. Verdiene er basert på døgnverdier og årsflommer. Tabellen er hentet fra Leine (2015).

Serie	Periode	Qm	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Rosten	1917-2014	306	379	438	493	566	621	676	747	802
Lalm	1907-2014	689	827	937	1047	1185	1288	1392	1530	1633
Lalm tilsig	1914-2013	749	884	996	1101	1236	1341	1446	1580	1678
Arbeids- serien	1917-2018	935	1141	1300	1459	1655	1814	1964	2160	2309

Tabell 3: Verdiene i tabellen viser den fineste tidsoppløsningen for vannføringsserien til Lalm og Rosten.

Tidsoppløsning Rosten (2.614.0) og Lalm(2.25.0)			
Rosten		Lalm	
Tidsintervall	Oppløsning	Tidsintervall	Oppløsning
27.10.1945 – 26.01.1986	1 døgn	03.03.1971 – 31.12.1985	1 døgn
27.01.1986 - 05.01.1998	Ca. 3-6 ganger daglig	31.12.1985 - 26.05.1994	Ca. 3-6 ganger daglig
05.01.1998 – 30.12.1998	1 døgn	02.06.1994- 30.12.1998	1 døgn
03.01.1999 – 02.03.2022	Hver time	01.01.1999- 28.02.2022	Hver time

## 4.2 Direkte konsekvenser som følge av flom på infrastrukturen

For å kartlegge flomfaren i studieområdet er programmet HEC-RAS benyttet. HEC-RAS er utviklet av det amerikanske forsvaret, avdeling U.S Army Corps of Engineers, og det er et program for analyse av elvesystemer. HEC-RAS inneholder fire beregningsmoduler, en-dimensjonal stasjonær strømning, en- og to-dimensjonal ikke-stasjonær strømning, sedimentanalyse og vanntemperaturanalyse/vannkvalitetsmodellering (US Army Corps of Engineers, 2022).

Det er laget en hydraulisk modell av elvesystemet i studieområdet, der det er simulert for åtte ulike returperioder. Simuleringene produserte vanndybdekart og vannhastighetskart. Det ble til sammen utført simuleringer for 32 hendelser; 16 der Otta er flommende elv, der åtte med klimapåslag og åtte er uten. Tilsvarende er 16 simuleringer gjort når Lågen er flommende elv, åtte med klimapåslag og åtte. Klimapåslag gir hvor mye man må øke dagens flomvannføring, ettersom klimaforandringer vil gi en økt flomfare. Et klimapåslag på 20% ble benyttet etter anbefaling fra Lawrence (2016).

### 4.2.1 Strømning

I denne oppgaven er det benyttet to-dimensjonal modellering i ikke-stasjonærstrømningsmodulen. Strømningsberegninger i modulen er basert på to fysiske lover, bevaring av bevegelsesmengde og konservering av masse. Ligningen for konservering av masse er vist under:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Ligning 3}$$

H er vannoverflatehøyde, t(s) er tid, h(m) er vanndybde, u(m/s) og v(m/s) er hastigheter i x- og y-retning, q(m<sup>3</sup>/s) gir innstrømning fra eksterne kilder. HEC-RAS bruker to forskjellige metoder for å beregne 2D-strømning, «Full Momentum» og «Diffusion Wave». «Full Momentum» benytter gruntvannsligningene i simuleringen (Ligning 4 og Ligning 5).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + \nu f \quad \text{Ligning 4}$$

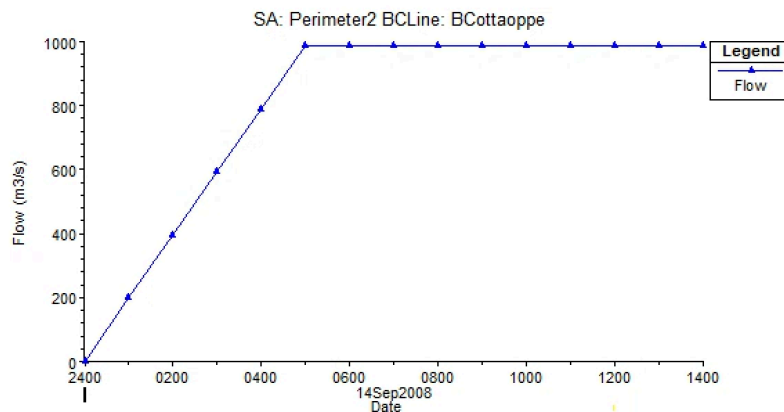
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + \nu f \quad \text{Ligning 5}$$

u og v er hastigheter i retning i kartesiske retninger, g er tyngdeakselerasjonen,  $\nu_t$  er den horisontale eddy viskositetskoeffisienten.  $c_f$  er bunnfriksjonen, R er den hydrauliske radiusen og f er coriolisparameteren. Den venstre siden representerer akselerasjonskomponentene, mens den høyre siden representerer kreftene som virker på vannet. Beskrivelsen av ligningene er hentet fra Brunner (2016a), som også gir en mer detaljert beskrivelse. «Diffusion Wave» bruker en forenklet form av grunnvannsligningene, der det sees bort fra lokal akselerasjon, advektiv akselerasjon, turbulens og corioliseffekten. Den krever mindre datakraft og simuleringen tar dermed mindre tid (Brunner, 2016b). «Full Momentum» metoden ansees som mer korrekt og anbefales når de to metodene viser forskjellige resultater (Brunner, 2016b). Brunner (2016b) mener at det er ønskelig å benytte «Full Momentum» hvis man ønsker detaljert hastighet og vanndybde rundt strukturer. Dette er ønskelig i denne oppgaven, og «Full Momentum» metoden er derfor benyttet. Det er også gjort simulering med «Diffusion Wave» som viste relativt forskjellige resultater i forhold til «Full Momentum».

Nøyaktigheten av simuleringen i HEC-RAS avhenger av hvilket tidsintervall en bruker i simuleringen. Et for høyt tidsintervall vil føre til feil i simuleringen. Et for smalt tidsintervall vil derimot føre til unødvendig lang simuleringstid (Brunner, 2016b). I modellen er det brukt et tidsintervall på ett sekund. Det er også benyttet en funksjon som gjør at tidsintervallet blir justert ut fra Courant tallet som representerer hvor lenge en partikkel er i en celle. Det største mulige tidsintervall som kan benyttes i simuleringene er på 32 sekunder, og det minste på 0,02 sekunder.

I oppgaven er det simulert stasjonær strømming i ikke-stasjonærmodulen. I simuleringen er det brukt strømningshydrograf (Flow hydrograph) for de øvre grensebetingelsene, der vann

kommer inn i studieområdet fra Lågen og Ottaelven. Figur 25 viser et eksempel på en benyttet strømningshydrograf. Her økes vannføringen sakte til man når den ønskede vannføringen. Vannføringen holdes dermed konstant til vanndybde konvergerer.



Figur 25: Viser hvordan vann blir sendt inn i modellen via en strømningshydrograf. Y-aksen er vannføringen som sendes inn igjennom de øvre grensebetingelsene og x-aksen gir tidspunkt.

Det er brukt normal dybde (Normal depth) som den nedre grensebetingelsen. Normal dybde benytter friksjonshelningen som er funnet ved å ta helningen over den nedre grensebetingelsen. I modellen er friksjonshelningen satt til 0.006. HEC-RAS benytter deretter Manningsligning for å beregne hvordan vann strømmet ut av modellen (Brunner, 2016b). Normal dybde vil føre til feilkilder nær den nedre grensebetingelsen. For å unngå dette, er det i dette arbeidet kun benyttet simuleringsresultater fra ovenfor stryket ved den nedre grensebetingelsen. Passeringen til grensebetingelsene er illustrert i Figur 26.

#### 4.2.2 Terrengdata

For å konstruere terrengmodellen er en digital terreng modell, DTM, av studieområdet hentet fra Høydedata (Kartverket, 2022). Kartlaget «NVE Gudbrandsdalslågen 2016» og «Nord-Gudbrandsdalen 2013» er benyttet. Kartlagene har en oppløsning på 0,25mx0.25m. «NVE Gudbrandsdalslågen 2016» inneholder all dybde data brukt i modellen i tillegg til store deler av høydedataene utenfor elvebredden. «Nord-Gudbrandsdalslågen 2013» er bare benyttet på et begrenset område nært Otta sentrum der «NVE Gudbrandsdalslågen 2016» manglet data. Leverandør av «NVE Gudbrandsdalslågen 2016» er TerraTec AS som i september og oktober 2015 utførte oppmåling av elvebunnen med laser og ekkolodd (Sund, 2016). Tilsammen er 33 DTMer lastet ned og satt sammen i ArcGIS.

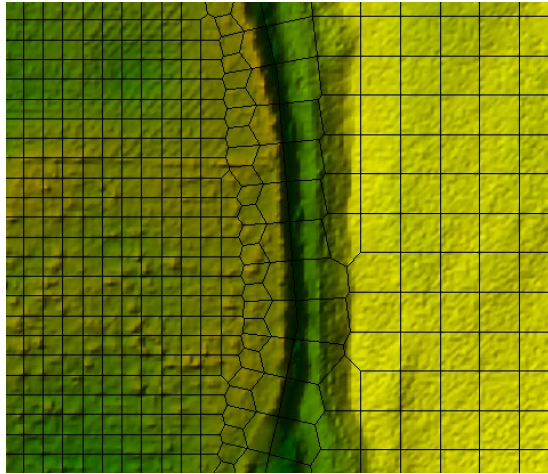


Figur 26: Terrengmodellen for studieområdet i meter over havet. Nedre grensebetingelse er vist med lilla strek og de øvre grensebetingelsene med blå streker.

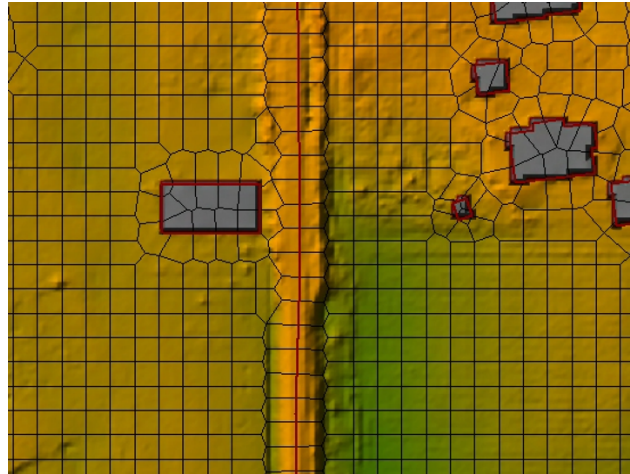
Kartlagene benyttet er DTM, der bygninger er fjernet. Det var derfor nødvendig å legge bygninger til terrengmodellen. Bygninger vil ha en påvirkning på strømningsmønsteret og er nødvendig for at modellen skal være korrekt. Bygningsdata er hentet fra datasettet FKB-Bygning. Her er shapefil av 2D-overflate til bygningene benyttet. Shapefilen er konvertert til raster, der hver bygning får verdi 20. Deretter summeres rasteret av bygninger med terrengrasteret ved bruk av verktøyet «CellStatistics». Dette fører til at alle bygninger får en høyde på 20m. Dette vil si at det antas at vannet ikke beveger seg over eller igjennom noen punkter på bygningene. For å modulere broene i studieområdet er bare pilarene benyttet. For å modellere pilarene er det hentet informasjon fra en tidligere hydraulisk modell for Otta. Modellen er gjort tilgjengelig av NVE og er utviklet av Dr. Blasy – Dr. Øverland GmbH & Co.KG. Pilarene i modellen ble inspisert og lignende pilarer ble lagt til i terrengmodellen via

«*raster calculator*» i ArcGIS. NVE atlas har registrert et flomverk som har blitt satt opp etter at DTMet ble konstruert. Flomverket har plassering på nordsiden av Ottaelven mellom jernbanebroa og Otta bru. Geometrisk informasjon om flomvollen er gitt av Sel Kommune. Flomverket er blitt vurdert til å ha liten betydning på infrastrukturen. Geometrisk data til flomverket ble mottatt etter de første simuleringene, i lys av dette og den lave betydningsgraden så ble flomverket ikke tegnet inn i modellen. Terrengmodellen som er benyttet i oppgaven er vist i Figur 26.

HEC-RAS benytter en «subgrid» metode som gjør at detaljert terrengdata ikke går tapt ved bruk av et relativt grovt beregningsnett. Dette oppnår HEC-RAS ved å benytte informasjon fra den detaljerte terrengmodellen, blant annet forholdet mellom volum og terrenghøyde for hver celle. Vannhøyden kan dermed representeres detaljert ved bruk av et relativt grovt beregningsnett. I modellen er det brukt et beregningsnett på 5x5m. Enkelte områder i elven der det er få fysiske forskjeller, er det benyttet et beregningsnett på 10x10m, dette for å korte ned på simuleringstiden. Figur 27 illustrerer beregningsnettene. Til høyre i figuren er det benyttet et 10x10m beregningsnett, til venstre er det benyttet 5mx5m. For å tilpasse beregningsnettene til terrenget og få en mer korrekt simulering er det benyttet bruddlinjer. Bruddlinjer brukes for å endre beregningsnettene slik at cellene tilpasser seg strukturer og terrenget. En bruddlinje vil tvinge beregningsnettene til å bevege seg langs bruddlinjen. I modellen er det tegnet inn bruddlinjer der det er bråe endringer i terrenget, langs elvebredden, rundt bygninger og langs midtlinjen til vei og jernbane. Figur 28 viser et eksempel på bruk av bruddlinjer i modellen.



Figur 27: Figuren viser hvordan ulik rutenett er benyttet på ulike steder. Til høyre er det benyttet et 10x10m rutenett for elveleiet. Til venstre, utenfor elveleiet, er det benyttet 5x5m rutenett.



Figur 28: Figuren viser hvordan bruddlinjer, markert med rødt, er plassert langs infrastrukturen og rundt bygninger.

I dette studiet er infrastrukturen i fokus, og bruddlinjene er derfor tilpasset for å gi en best mulig modellering rundt infrastrukturen. Det er valgt å benytte en bruddlinje langs midtlinjen av infrastrukturen. Grunnet at beregningsnettet er grovt i forhold til bredden på infrastrukturen, vil nøyaktigheten av resultatene bli mindre, men er vurdert tilfredsstillende for denne oppgaven. Som alternativ kunne en benyttet flere bruddlinjer langs infrastrukturen, som kantene av en vei. Man kunne også benyttet «Refinement Regions» eller «Near Spacing for å få et finere beregningsnett nær infrastrukturen.

#### 4.2.3 Kalibrering og Manningskoeffisienter

Manningskoeffisient,  $n$ , brukes til å bestemme friksjonsforholdene i analyseområdet.

Manningskoeffisienter benyttet i oppgaven, er hentet fra Chow (1959) og Brunner (2021) og er listet i Tabell 4.

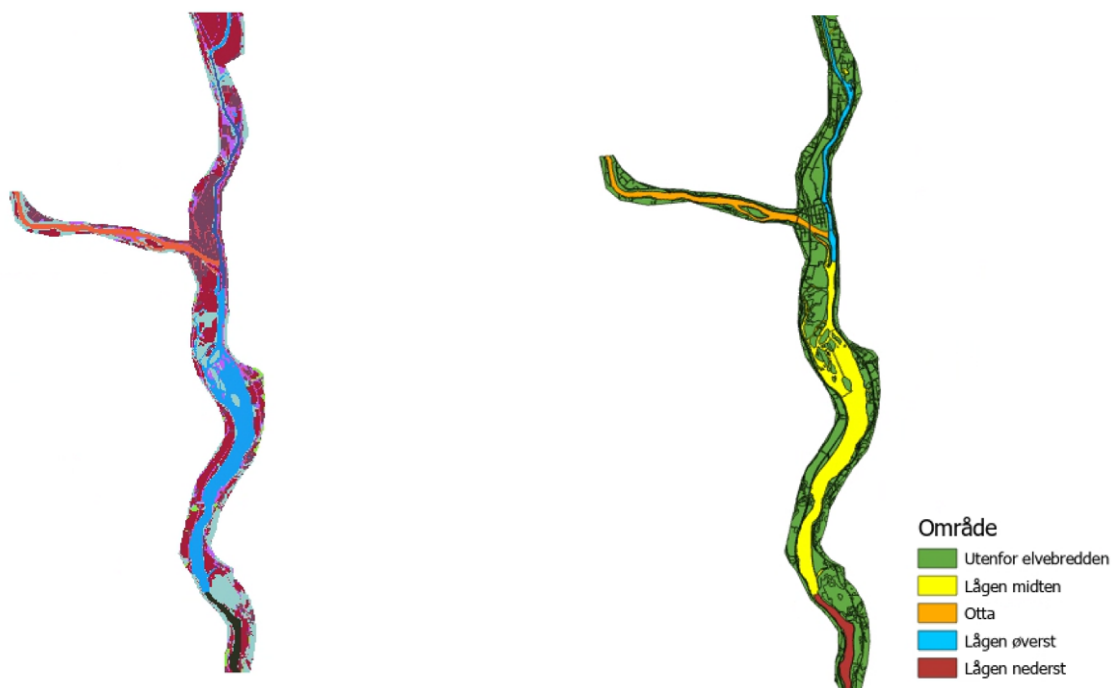


Tabell 4: Manningskoeffisientene som er benyttet i HEC-RAS- modellen, hentet fra Chow (1959) og (Brunner, 2021). De fire nederste radene i tabellen gir de kalibrerte verdiene for elvebunnen i modellen.

Arealtype	Manning n ( $\text{sm}^{-1/3}$ )
Samferdsel	0,025
Fulldyrket jord	0,035
Innmarksbeite	0,037
Overflatedyrket jord	0,035
Ferskvann	0,037
Åpen fastmark	0,040
Skog	0,120
Bebygd	0,120
Otta	0,044
Lågen øverst	0,023
Lågen midten	0,037
Lågen nederst	0,035

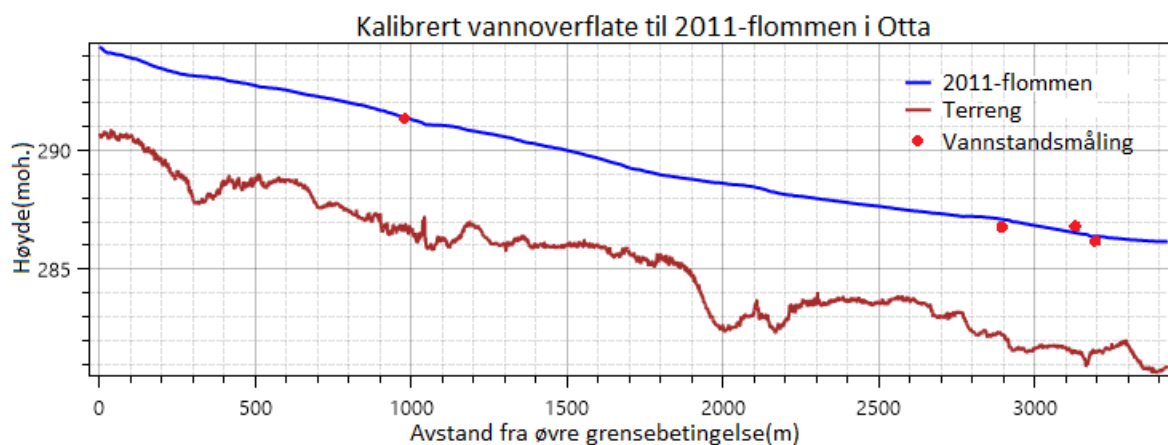
Oppdelingen av områder for Manningkoeffisientene er vist i Figur 29. Oppdelingen er basert på arealtyper som er hentet fra datasettet FKB-AR5. Modellen er kalibrert ved å endre på Manningskoeffisientene for elvebunnen. Elvebunnen ble delt inn i fire områder, basert på elvens topografi (Figur 30). Modellen er kalibrert for flommen i 2011. Vannføringsdata fra 2011 er hentet fra Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019) og gir en vannføring i Otta på  $986 \text{ m}^3/\text{s}$  og i Lågen på  $745 \text{ m}^3/\text{s}$ . Disse vannføringene representerer maks vannføring under flommen og ved å bruke disse verdiene antar man at Otta og Lågen kulminerte samtidig, en antagelse som kan føre til at vannføringen blir for høy i nærheten og nedenfor samløpet. For høye vannføringer kan føre til at Manningkoeffisientene settes for lavt, noe som videre kan føre til at modellen simulerer for lave vannstander. Målte vannstander under flommen i 2011 ble gitt personlig av Dr. Øverland (Personlig kommunikasjon, 3. mars 2022). Tilsammen ble det brukt fire målinger i Otta-området, og tre i Lågen-øverst (Figur 30). Modellen ble kalibrert

for disse verdiene, og det maksimale avviket ble redusert til 30cm. Figur 31 og Figur 32 viser kalibreringen i henholdsvis Otta og i Lågen nord for samløpet. Det fantes ikke målinger for områdene nedenfor samløpet, Lågen-midten og Lågen-nederst (Figur 30). Verken Sel kommune, Nye Veier AS eller NVE hadde ført vannstandverdier for flommen i 2011. For å fastsette Manningskoeffisienter i området «Lågen midten» ble modellen kalibrert mot modellen til Dr. Blasy – Dr. Øverland GmbH & Co.KG. Den kalibrerte modellen ble også sjekket ved å simulere flommen i 1995, der data ble hentet fra Høydal et al. (2000). Det fantes ingen vannstands måling for området «Lågen-nederst» for verken 2011 eller 1995 flommen. Manningskoeffisientene for dette område er derfor basert på verdier fra Chow (1959). Ferdig kalibrerte verdier er vist i nederst i Tabell 4.

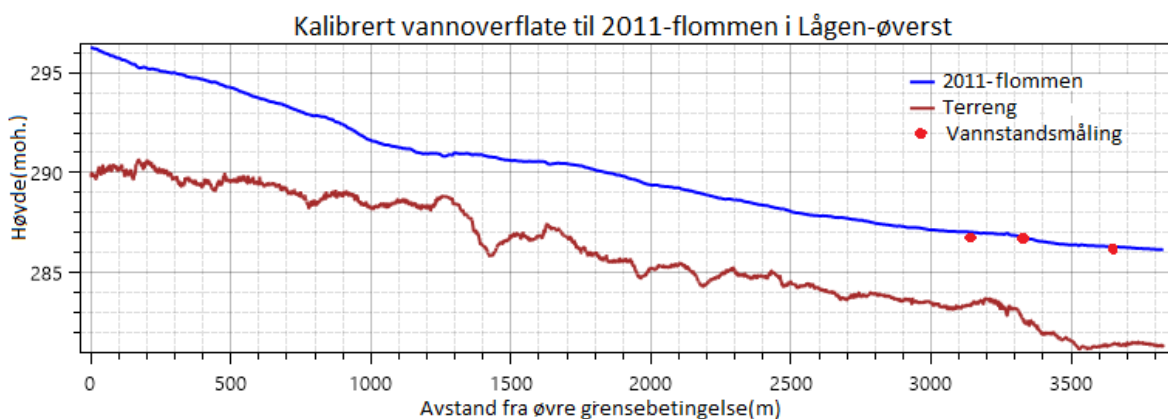


Figur 29: Oppdelingen av områder for Manningskoeffisienter basert på arealtype.

Figur 30: Oppdelingen av elvebunnen i områder brukt for kalibrering.



Figur 31 Kalibrert vannoverflate til 2011-flommen i Otta. Blå linje viser modellert høyde til vannoverflaten til 2011-flommen og røde punkter viser vannstandsmålingene som ble foretatt under flommen.



Figur 32 Kalibrert vannoverflate til 2011-flommen i Lågen-øverst. Blå linje viser modellert høyde til vannoverflaten til 2011-flommen og røde punkter viser vannstandsmålingene som ble foretatt under flommen.

#### 4.2.4 Hydrologiske data

Det er to elver som renner inn i studieområdet, Otta og Lågen. Det gjør det nødvendig å modellere hver returperiode to ganger, en for når hver av de to elvene kulminerer. Tabell 5 og Tabell 6 er hentet fra Leine (2015) og viser vannføringer når det er flommer i Otta og Lågen. Disse vannføringene er benyttet for de øvre grensebetingelsene i modellen. Dette gir to simuleringer for hver returperiode. I dette arbeidet har det vært ønskelig å lage et farekart for hver returperiode. I oppgaven er de to resulterende kartene for hver returperiode slått sammen, ved å benytte den maksimale dybden. Ovenfor samløpet vil dette gi en korrekt representasjon av returperioden. Nedenfor samløpet vil dette innebære en feilkilde ettersom elvene kan flomme uavhengig av hverandre og gi en lavere

returperiode. Leine (2015) skriver at man kan anta at returperiode nedenfor samløpet, er lik som i Otta når Otta er flomførende elv. Fra Tabell 5 og Tabell 6 ser man at vannføringen nedenfor samløpet er nesten identisk i de to tabellene. I lys av dette er det benyttet maksimal vannføring fra hver av de to simuleringene også nedenfor samløpet.

Tabell 5: Vannføringer når Otta er flommende elv. Vannføringene for Otta er kulminasjonsvannføringen og vannføringene i Lågen er vannføringene når Otta kulminerer.

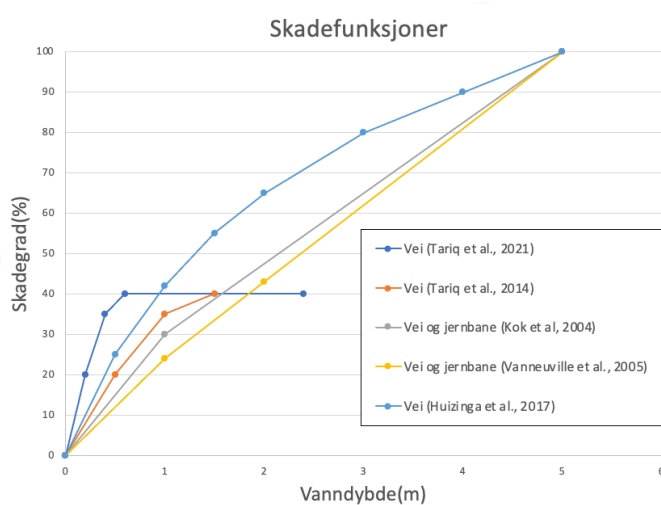
Otta er flommende elv									
(m <sup>3</sup> /s)	QM	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Otta	674	796	895	990	1113	1283	1390	1530	1637
Lågen Oppstrøms	419	367	426	486	566	624	693	789	865
Nedenfor samløpet	1093	1163	1320	1475	1679	1906	2082	2320	2502

Tabell 6: Vannføringer når Lågen er flommende elv. Vannføringene for Lågen er kulminasjonsvannføringen og vannføringene i Otta er vannføringene når Lågen kulminerer.

Lågen er flommende elv									
(m <sup>3</sup> /s)	QM	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Otta	674	676	760	841	946	1090	1181	1301	1391
Lågen Oppstrøms	402	497	575	649	745	817	888	983	1055
Nedenfor samløpet	1076	1173	1335	1490	1691	1907	2070	2284	2446

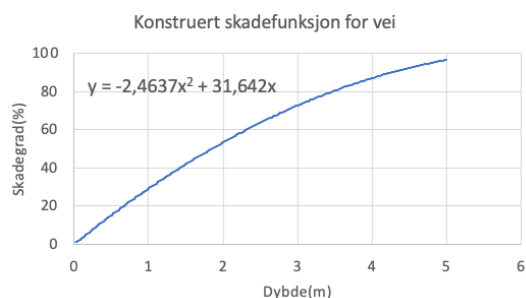
#### 4.2.5 Skadefunksjoner

Ved starten av oppgavearbeidet var det ønskelig å benytte skadedata for å konstruere skadefunksjoner. Slike kan lages ved å knytte kjente vanddybder til kjent skade. Etter møte med Statens Vegvesen og Bane NOR ble det derimot klart at det finnes for lite data tilknyttet flom og skader på infrastruktur. Det var derfor nødvendig å se på skadefunksjoner fra litteraturen. Habermann and Hedel (2018) gir en oversikt skadefunksjoner på infrastruktur. Figur 33 viser en rekke skadefunksjoner for infrastruktur som er hentet fra litteraturen. Skadegraden oppgis i prosent, der 100% er total ødeleggelse(skade).

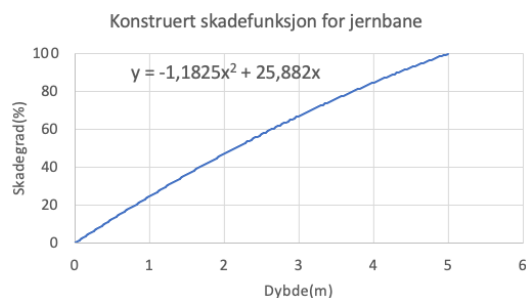


Figur 33 Skadefunksjoner for infrastruktur (Tariq et al., 2021) (Tariq et al., 2014) (Kok et al., 2004) (Vanneuille et al., 2005) (Huizinga et al., 2017).

Ved bruk av skadefunksjonene i Figur 33 ble det tilpasset en skadefunksjon for vei og en skadefunksjon for jernbane, vist i Figur 34 og Figur 35.



Figur 34: Konstruert skadefunksjon for vei.



Figur 35. Konstruert skadefunksjon for jernbane.

#### 4.2.6 Skadegrad, kostnader og risiko

Skadegrader og kostnader tilknyttet direkte konsekvenser av flom ble beregnet ut i fra resultatene fra HEC-RAS og skadefunksjonene i Figur 34 og Figur 35. Det ble beregnet skadegrad for hver av de modellerte returperiodene. De resulterende skadegradene ble dermed koblet sammen for å finne forventet årlig skadegrad. Forventet årlig skadegrad ble videre koblet til infrastrukturkostnader for å finne forventet årlig kostnad.

Forventet årlig kostnad blir brukt som et mål på flomrisiko i denne oppgaven. Utregningen av forventet årlig kostnad som følge av flomskader i denne oppgaven baserer seg på Ligning 6, dette en revidert formel hentet fra Olsen et al. (2015).  $K(p)$  er kostnaden som forekommer ved ulike returperioder, hvor  $K$  er kostnad og  $p$  er sannsynligheten knyttet til forskjellige returperioder.  $l$  er lengden på infrastrukturstrækningen.

$$\text{Forventet årlig kostnad} = \iint_{lP} K(p) dp dl \quad \text{Ligning 6}$$

For å løse ligningen er Ligning 7 benyttet.

$$\text{Forventet årlig kostnad} = \sum_{i=2}^n K(p_i)(p_i - p_{i-1}) \quad \text{Ligning 7}$$

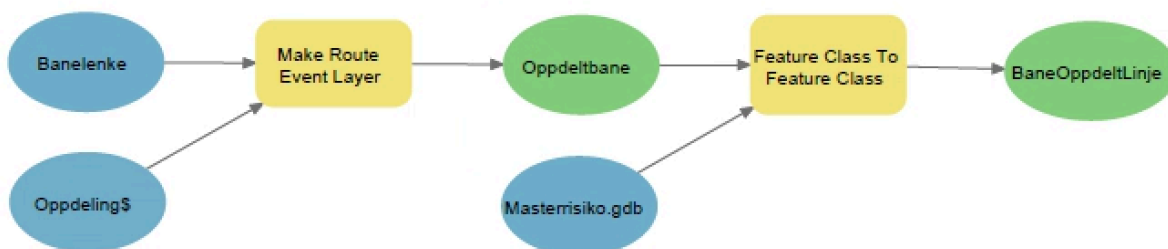
$p$  er her en liste over sannsynligheten for de forskjellige returperiodene brukt i modelleringen. Listen har  $n$  elementer og starter på null 0, deretter følger de ulike sannsynlighetene i økende størrelse. Ligning 7 kan endres til å gi forventet årlig skadegrad

(Ligning 8). Forventet årlig skadegrad gir den midlere skadegraden som forekommer på infrastrukturen hvert år når man ser over en lengre tidsperiode, der skadegrad er et mål på skaden som forekommer.

$$\text{Forventet årlig skadegrad} = \sum_{i=2}^n S(p_i)(p_i - p_{i-1}) \quad \text{Ligning 8}$$

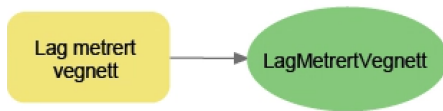
$S(p_i)$  er skadegrad ved de ulike returperiodene. Ligning 7 og Ligning 8 gir henholdsvis forventet årlig kostnad og forventet årlig skade på infrastrukturesegmentet som vurderes.

ArcGIS ble benyttet for å beregne skadegrad og kostnad. Figur 36 viser hvordan oppdelingen av banesegmentene ble utført. Oppdeling av infrastrukturen er nødvendig for å skille ulike områder fra hverandre. Strekningen ble delt inn i sekvenser med en lengde på fem meter. Dette ble gjort ved å importere og bruke datasettet FKB-bane, hentet fra GEODATA (Geovekst, 2022). Datasettet er illustrert med «Banelenke» i Figur 36. Det ble dermed laget et regneark som viste start- og slutt punkter for segmentene, «Oppdeling\$» i Figur 36. Oppdeling av banesegmentene ble gjort med verktøyet «Make Route Event Layer» og deretter lagret i en geodatabase med verktøyet «Feature Class To Feature Class».



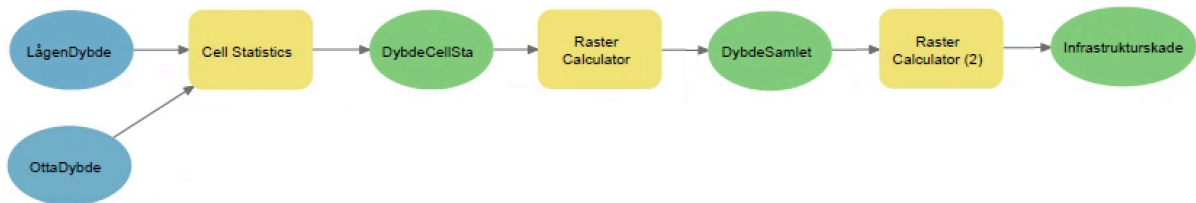
Figur 36: Figuren illustrerer hvordan banen er oppdelt i segmenter i programmet ArcGIS.

Vegdata benyttet i oppgaven er hentet fra Nasjonal vegdatabank(NVDB) (Statens Vegvesen, 2017). Verktøyet «Lag metrert vegnett» fra NVDBs verktøykasse ble brukt for å hente metrert vegnett til ArcGIS (Figur 37). På grunn mindre informasjon tilknyttet dataene for vegnettet enn for bane, var det nødvendig å utføre oppdelingen av veien via divide-funksjonen i editmenyen. E6 og RV15 ble begge delt inn i 5m segmenter.



Figur 37: Figuren viser hvordan Vegvesenets verktøykasse i ArcGIS brukes for å hente ut metrert vegnett.

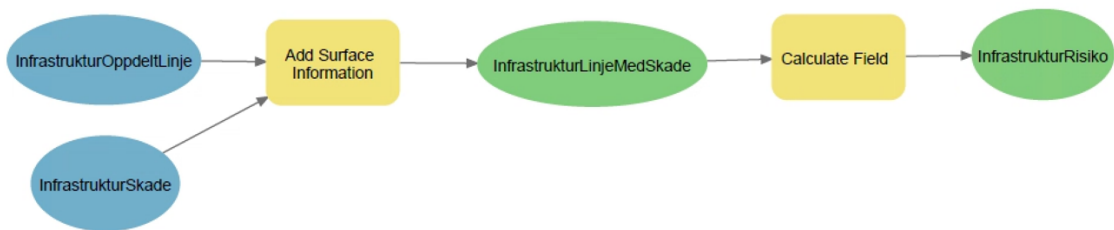
Figur 38 viser hvordan dybdekartene eksportert fra HEC-RAS ble omgjort til å vise skadedata. Siden Lågen og Otta ikke flommer samtidig, har det vært nødvendig å slå sammen farekartene for de to elvene for hver returperiode. Dette ble gjort med verktøyet «Cell Statistics» som legger sammen farekartene og gir den maksimale verdien der det er overlapp mellom kartene. Deretter ble alle «null» verdier endret til å ha verdien 0 i «Raster Calculator». «Raster Calculator» ble igjen utført på det resulterende kartet, her ble skadefunksjonen fra Figur 34 og Figur 35 koblet med dybden. Dette har gitt et kart som viser skade på infrastrukturen, men også skade utenfor denne.



Figur 38: Figuren viser hvordan skade på infrastrukturen er beregnet i ArcGIS.

For å trekke ut skadedata fra «InfrastrukturSkade» til «InfrastrukturOppdeltLinje» ble verktøyet «Add Surface Information» benyttet (Figur 39). Verktøyet regner ut gjennomsnittlig skadegrad for hver 5-meter segment. Deretter ble skadedataene inspisert og korrigert for blant annet broer. Deretter ble «Calculate field» brukt til å regne ut forventet årlig kostnad og forventet årlig skadegrad ved bruk av henholdsvis Ligning 7 og Ligning 8. Til slutt ble total forventet årlig kostnad beregnet ved bruk av «Summary statistics» i ArcGIS.





Figur 39: Viser hvordan risiko er beregnet ved å bruke beregnet skade på infrastrukturen.

For å beregne forventet årlig kostnad ved bruk av Ligning 7, er prisen på infrastruktur benyttet. I Teknisk Ukeblad ble en oversikt over meterpris for vei fra Statens Vegvesen gjengitt (Solberg, 2014). Oversikten er ikke tilgjengelig på Statens Vegvesen sine sider lenger, men den blir brukt flere steder og regnes som tilfredsstillende for denne oppgaven. Blindheim (2016) bekrefter at tallene stemmer med nyere beregninger fra Staten Vegvesen. Tabell 7 viser prisene for utbygging av en meter vei.

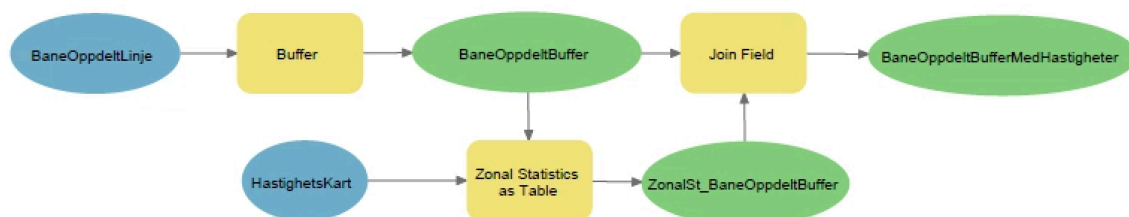
Tabell 7: Meterpris for veiutbygging (Solberg, 2014)

Meterpris for veiutbygging				
Felt	Veibredde(m)		Pris(kr/m) (NOK2014)	Pris(kr/m) (NOK2022)
2-felts vei	6,5		50 000 – 90 000	60 947 – 109 704
2-felts vei	7,5		60 000 – 100 000	73 136 – 121 893
2-felts vei	8,5		70 000 – 120 000	85 325 – 146 273
2-felts vei	10	Forsterket midtoppmerking	80 000 – 140 000	97 514 – 170 650
2/3 felts vei			110 000 – 150 000	134 082 – 182 839
4-felts vei	16	Kryss i plan	120 000 – 170 000	146 273 – 207 218
4-felts vei	19-22	Planskilte kryss	140 000 – 230 000	170 650 – 280 354

Veibredde for de enkelte strekningene er funnet i Statens Vegvesen Vegkart. E6 har en veibredde på tilnærmet 8,5 m, og RV15 en bredde på 7,5 meter. Den nedre grensen for meterpris er benyttet i denne oppgaven. Dette gir en meterpris på 85 325kr for E6 og 73 136 for RV15.

Samferdseldepartementet (2006) har utgitt et notat som legger prisen på jernbanens enkeltspor mellom 50 og 200 millioner 2007-NOK per km. Dette tilsvarer 70,34 – 281,27 millioner 2022-NOK per km. Tallene inkluderer svært mange aspekter ved utbygging og vil derfor være høyt. Den lavere grensen er derfor benyttet som gir drøyt 70 000 kr/meter (2022). Estimater samsvarer med internasjonale priser (Attinà et al., 2018).

For å undersøke skadefunksjonene benyttet er det valgt å vurdere skadefunksjonen på jernbanen nærmere. Det er laget figurer av jernbanen der jernbanesegmentene er satt på en buffer som registrerer maksimal hastighet innenfor bufferen. Figur 40 viser hvordan dette ble implementert i ArcGIS. BaneOppdeltLinje fra Figur 36 tillegges en buffer. Verktøyet «Zonal Statistics as table» benyttes for å finne maksimal hastighet for hver polygoncelle. De respektive maksimale hastighetene kobles dermed til Oppdelte banen via verktøyet «join field».



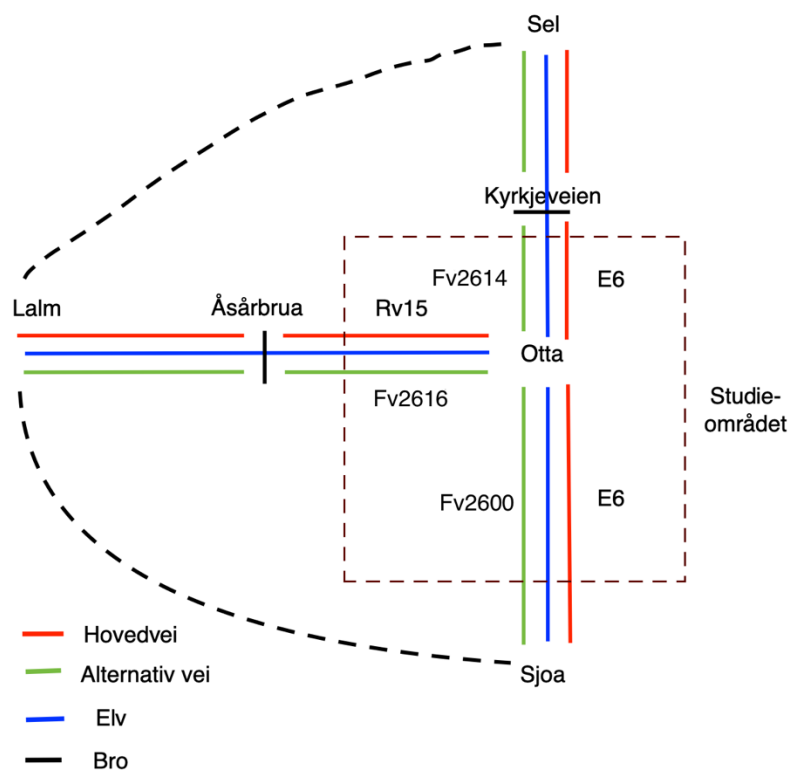
Figur 40: Figuren viser hvordan hastigheter er koblet til en buffer på et jernbanesegment i ArcGIS.

### 4.3 Indirekte konsekvenser fra flom på infrastrukturen

Flom i hovedvassdrag er et fenomen som dekker et større område, noe som gjør det vanskelig å beregne kostnader fra flom som følge av stengt infrastruktur på et avgrenset område. Ved stengt infrastruktur i Otta som følge av flom er det sannsynlig at det også forekommer stengt infrastruktur på andre steder nær vassdraget. Ved å se på flom knyttet til et regionalt område kreves det farekart for området i tillegg til transportmodeller. I denne oppgaven er det sett bort fra at flom forekommer utenfor studieområdet. Denne antagelsen er grov, men vil gjøre det mulig å beregne et anslag på kostnadene knyttet til stengt infrastruktur. Beregningen er begrenset til kostnader knyttet til tidsverdier og utgifter på kjøretøy. Tidsverdier angir verdien av tiden til de reisende, og kjøretøykostnader er utgifter på kjøretøyene, for eksempel drivstoffutgifter. Kostnadene knyttet til vei og jernbane er analysert med to ulike modeller.

Figur 41 viser modellen som er satt opp for vei i studieområdet. Modellen har fokus på hovedveiene i området, E6 og RV15, markert med rød strek. Ved stengt hovedvei kan den alternative veien er på andre siden av elven benyttes. I de tilfellene der også denne er stengt, må det beregnes omkjøring langs de stiplede linjene. Modellens oppbygning krever at det antas start og sluttdestinasjon for reisene:

- E6 sør for Otta er omtalt som E6-Sør i denne oppgaven. Her er det antatt at reisende kjører mellom Otta og Sjoa når Fv2600, Rv15 og/eller Fv2616 er åpen, med Fv2600 er førstevalg, Rv15 andrevalg og Fv2616 tredjevalg. Hvis disse er stengt antas reiserute fra Sjoa til Sel via Lalm (Figur 41)
- Ved stenging av Rv15 regnes først omkjøring på Fv2616. Er Fv2616, regnes omkjøring via Sel. Er omkjøring via Sel også stengt, regnes omkjøring via Sjoa.
- For E6 mellom Kyrkjeveien og Otta, omtalt som E6-nord, regnes først omkjøring via Fv2614. Hvis Fv2614 er stengt regnes omkjøring via RV15 eller Fv2616. Er disse stengt regnes reiserute fra Sel til Sjoa.
- I tilfelle der alle veiene er strengt inn til Otta, vil det kreve annen måte å beregne kostnadene på, noe som av tidshensyn ikke gjort er i denne oppgaven.



Figur 41: Skisse av modellen benyttet til å beregne kostnader knyttet til tidsverdier og kjøretøykostnader for vei.

Beregning av kostnader er basert på en rekke faktorer, for eksempel gjennomsnittlig antall kjøretøy på veien per døgn, ÅDT. Denne måles i løpet av et år ettersom trafikkmengden varierer i løpet av året. ÅDT for de ulike veistrekningene er vist i Statens Vegvesens Vegkart (Statens Vegvesen, 2022). Kartet gir imidlertid ingen informasjon om start og sluttdestinasjons for reisende, og det skiller heller ikke mellom lokal trafikk og langdistansetrafikk. Vegkartet gir også informasjon om andel lange kjøretøy. ÅDT og lange kjøretøy for hovedveiene i studieområdet er vist i Tabell 8

Tabell 8: ÅDT og andel tunge kjøretøy for Rv15, E6-nord og E6-sør. Verdier hentet fra Statens Vegvesen (2022)

	Ottadalen	Gudbrandsdalen nord for Otta	Gudbrandsdalen sør for Otta
Vei	Rv15	E6-Nord	E6-Sør
ÅDT	3500	5000	6159
Andel lange kjøretøy av ÅDT	15%	25%	21%

Kostnadene som er beregnet i oppgaven, er tidsverdi- og kjøretøykostnader. Generelle tidsverdier og kjøretøykostnader er hentet fra Statens Vegvesens håndbok for konsekvensanalyser (Tabell 8)(Tabell 9) (Statens Vegvesen, 2021). Håndboken har hentet tidsverdier for lette kjøretøy og tog fra Flügel et al. (2020), mens kjøretøykostnader og tidsverdier for tungekjøretøy er gitt av COWI. I dette arbeidet er beregningen forenklet ved at busser er inkludert med i kategorien tungkjøretøy. Prisene for kategorien tunge kjøretøy er imidlertid beregnet uten busser. Busser er oppført med egne kostnader, men på grunn av usikkerhet knyttet til andel busser av tunge kjøretøy i ÅDT og antall passasjerer i hver buss er dette sett bort i fra i dette arbeidet. Kjøretøyene omtalt som lange kjøretøy (Statens Vegvesen, 2022) antas å tilsvare tunge kjøretøy hentet fra (Statens Vegvesen, 2021). De konstruerte kostnadsformlene er vist i Tabell 11.

Tabell 9: Tidsverdier for transportmiddel. Verdier for bil og tog, verdier for tungekjøretøy. Tidsverdikostnader for bil er beregnet ut i fra reiser mellom 70 og 200km, og tog er beregnet for 200km. Justert for inflasjon og viser (2022-NOK).

	Tidsverdikostnader					
Transporttype	Lett bil (mellom 70 og 200km)			Tog (over 200km)		Tungekjøretøy
	Andel	Personbelegg	Tidsverdi (kr/person-time)	Andel	Tidsverdi (kr/person-time)	
Tjenestereise	0,2	1,15	525,74	0,14	427,70	
Til og fra arbeid	0,23	1,1	211,16	0,07	238,09	
Fritid	0,56	1,9	134,67	0,79	152,98	
Kr/persontime				197,40 kr		
Kr/time(transportmiddel)	317,63 kr					812,31 kr/time

Tabell 10: Kjøretøykostnader justert for inflasjon.

	Kjøretøykostnader	
Kjøretøytype	Lette kjøretøy	Tunge kjøretøy
Kjøretøykostnad	1,78 kr/km	5,13 kr/km

Tabell 11: Benyttede kostnadsformler for ulike transporttyper.

	Kostnadsformler for ulike transporttyper		
Transporttype	Lette kjøretøy	Tog	Tunge kjøretøy
Kostnad	317,63 kr/time +1,78 kr/km	197,40 kr/time/passasjer	812,31 kr/time + 5,13 kr/km

Ved å benytte Tabell 11 kan kostnadene for de ulike omkjøringene i studieområdet bli beregnet ved følgende ligninger:

Kostnader for lette kjøretøy = Ligning 9

$$(\text{ÅDT}_{\text{andel\_lette}} * \frac{\text{ÅDT}_{\text{tot}}}{24} * (317,63 * \text{ekstratid} + 1,78 * \text{ekstradistanse}) * \text{varighet}$$

Kostnader for tunge kjøretøy = Ligning 10

$$(\text{ÅDT}_{\text{andel\_tunge}} * \frac{\text{ÅDT}_{\text{tot}}}{24} * (812,31 * \text{ekstratid} + 5,13 * \text{ekstadistanse}) * \text{varighet}$$

Totalkostnad = Ligning 11

$$\text{Kostnader for lette kjøretøy} + \text{Kostnader for tunge kjøretøy}$$

Ligning 9, Ligning 10 og Ligning 11 gir her kostnaden knyttet til omkjøring som følge av stengt vei, og er basert på tilsvarende ligninger i Gindrat (2020) og Statens Vegvesen (2021). Kostnadene er avhengig av hvor lenge veien er stengt, som blir representert av variabelen *varighet* i ligningene. Ekstra tid knyttet til hver enkelt omkjøring, «ekstratid», og ekstra distanse, «ekstradistanse» er beregnet i Google Maps.

For tog er det brukt en mindre kompleks modell ettersom det bare går en enkelt toglinje igjennom studieområdet. Dovrebanen som passerer studieområdet har både persontransport og godstransport. På grunn av lite tilgjengelig informasjon om godstrafikken, er det valgt å avgrense oppgaven til persontransport. For tog blir det bare sett på tidskostnader. Tabell 12 viser persontog som passerer Otta.

Tabell 12: Viser antall tog passeringer i Otta for ulike togtyper.

Dovrebanen	Trafikkmengde	Strekning	Kilde:
Regiontog	1,85 passeringer per dag	Lillehammer-Dombås	(Vy, 2022)
Fjerntog	9,14 passeringer per dag	Trondheim S – Oslo S	(SJ, 2022) (Vy, 2022)
Lillehammer mot Raumabanen	1,43 passeringer per dag		(Parnemann, 2016) (Vy, 2022)

For å kunne beregne tidskostnader for passasjerene, er det nødvendig å gjøre et anslag over antall passasjerer per tog. For «regiontog» og «Lillehammer mot Raumabanen» finnes det lite informasjon om antall passasjerer. Disse regiontogene har mange ugunstige avgangstider som vil føre til lavt antall passasjerer. Det er av denne grunn valgt å se bort fra disse to i den videre beregningen. Oppgaven fokuserer i stedet på fjerntog, som utgjør størsteparten av persontogtrafikken.

I 2019 var det 858 000 påstigninger for nattog og fjerntog på Dovrebanen (SSB, 2020). Som følge av Corona-pandemien ble det en passasjerreduksjon på 47% fra 2019 til 2020 (SSB, 2021b). For å unngå effekten av pandemien ble det brukt tall fra 2019. Trøndelag i Tall (u.å.)

skriver at størsteparten av reisende på fjerntoget på Dovrebanen tar lange reiser mellom landsdelene. Etter vurdering er det gjort et anslag på at 70% av passasjerene på Dovrebanen passerer Otta. Av de 858 000 påstigningene vil altså 600 600 passere Otta. Dette gir i snitt 69,6 personer i timen.

Tidskostnader for tog er beregnet ut fra at det settes opp buss for tog. Det er antatt at stasjonene før og etter Otta, Vinstra og Dombås, er åpne. Buss for tog er dermed beregnet mellom disse stasjonene. Reisetiden mellom disse stasjonene for fjerntog er beregnet ved bruk av Vys reiseplanlegger (Vy, 2022). Buss for tog er beregnet med omkjøring rundt studieområdet via Lalm. Reisetiden er beregnet med Google Maps. Det er sett bort fra tidsforbruk ved bytte mellom tog og buss.

Tidskostnader for passasjerene på jernbanen er gitt av:

$$\text{Kostnad for stening av Dovrebanen} = \text{Ligning 12}$$

$$\text{Ekstratidomkjøring} * \text{tidskostnader} * \text{passasjerer} * \text{varighet}$$

Varighetene benyttet i Ligning 11 og Ligning 12 er hentet fra varighetsanalysen i dette arbeidet.

- De modellerte farekartene brukes for å finne det punktet på infrastrukturstrekningen som først blir dekket av vann. Dette kritiske punktet vil føre til at strekningen må stenges.
- Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet blir hentet for vannføringen til den årsflommen som først vanndekker dette punktet på infrastrukturen.

Dette gir gjennomsnittlig varighet for hvor lenge vannet vil dekke det svake punktet på infrastrukturen, og dermed hvor lenge i snitt infrastrukturen er stengt. Denne bl benyttet i Ligning 11 Ligning 12, som beregner gjennomsnittlig kostnaden for trafikantene ved stenging av infrastrukturen.



## 5 Resultater

### 5.1 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet

For å kunne koble den gjennomsnittlig overskridelsesvarighet til bestemte vannføringer, for eksempel en vannføring som tilsvarer en 50-årshendelse, var det nødvendig å finne en graf som representerte hvordan den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten varierer i forhold til ulike vannføringer. Etter vurderinger av ulike typer grafer ble det fastslått at gjennomsnittlig overskridelsesvarigheten ble best representert av en logaritmisk graf på formen  $y = a - b \cdot \log(x - c)$ , der  $a$ ,  $b$  og  $c$  er positive tall.  $y$  er gjennomsnittlig overskridelsesvarighet og  $x$  er vannføring som blir overskredet. Den logaritmiske grafen ble først generert ut fra regresjon av døgnverdidagrammene (f.eks. Figur 42). Den genererte ligningen ble deretter justert manuelt for å gi en optimal representasjon av gjennomsnittlig overskridelsesvarigheten. En av betingelsene for justering av den tilpassede linjen, var at den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten må være større enn null.

Hoppene i grafene som viser gjennomsnittlig overskridelsesvarighet, f.eks. i Figur 42, representerer der en flomhendelses topp er nådd. Dette vil gjøre at den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten for vannføringene rett over vil beregnes høyere. Figurene viser (f.eks. Figur 42) at den gjennomsnittlig overskridelsesvarighet går mot null for de høyeste terskelvannføringene med registreringer. Dette er som følge av at når terskelvannføringen er høy nok, vil det bare være én flom som registreres. Når terskelvannføringen stiger, vil dermed den registrerte overskridelsesvarigheten gå mot null når en nærmer seg flommens topp.

Minimum-tidsintervall mellom ulike flomtopper er satt til 24 timer for Lalm, 48 timer for Lalm tilsig, 24 timer for Rosten og 72 timer for Arbeidsserien. Minimums-tidsintervallet er satt for å gi en best representasjon av gjennomsnittlig overskridelsesvarigheten for de områdene som har hatt størst påvirkning på den tilpassede linjen. For alle vannføringsserier viste minimum-tidsintervallet å ha liten innvirkning på resultatet. For de høyeste vannføringene var det bare én distinkt flomtopp, noe som gjør at minimum-tidsintervallet ikke påvirker resultatet. Antall overskridelse diagrammene viste at det var svært få økninger

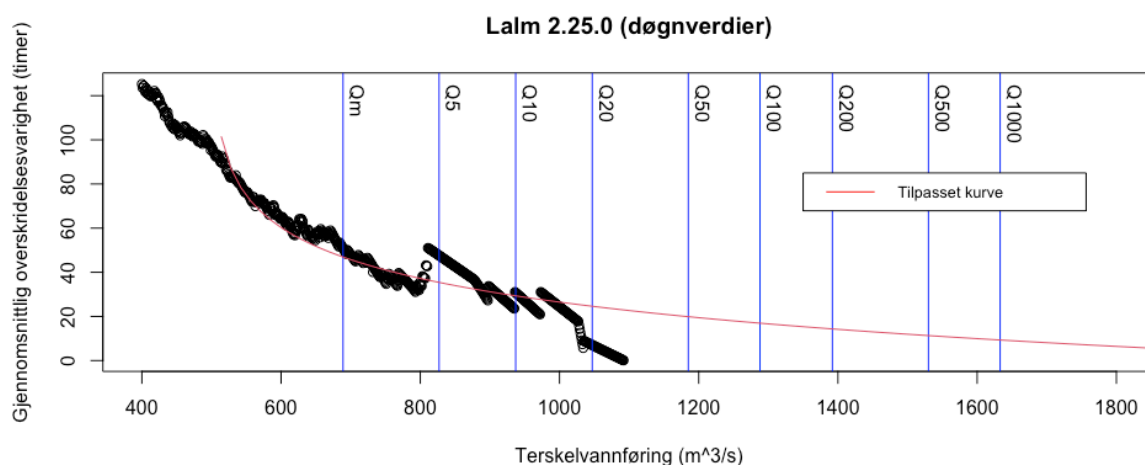
i antall overskridelser som følge av en høyere terskelvannføring. Dette indikerer at minimum-tidsintervallet benyttet er tilstrekkelig.

### 5.1.1 Lalm

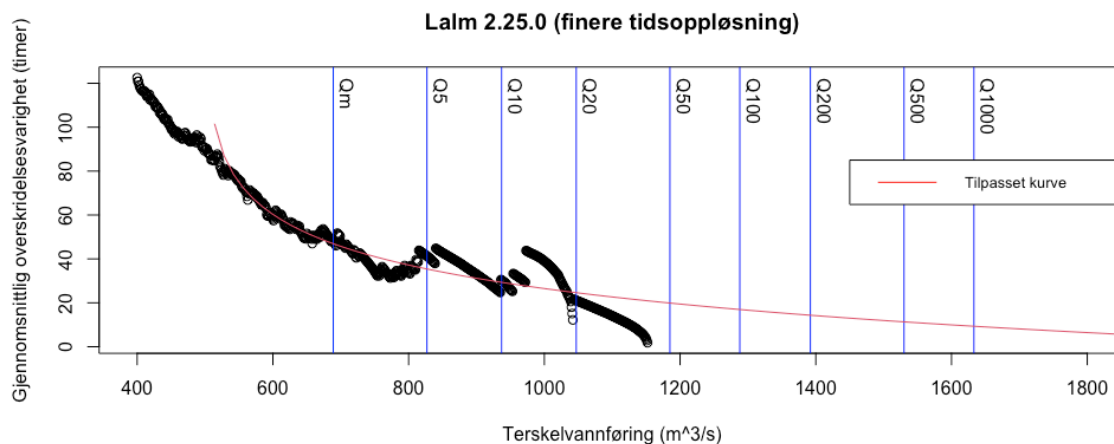
For Lalm er det ikke registrert høyere vannføring enn litt over en 20-årshendelse (Figur 42). Døgnverdier og finere oppløsning viser lik form for vannføring opp til terskelvannføring på 800m<sup>3</sup>/s (Figur 42 og Figur 43). Den finere tidsoppløsningen viser en større utflating. Finere tidsoppløsning registrerer som ventet høyere vannføring enn døgnverdier for samme flom. Det kan sees på figurene, der høyeste vannføring er 60 m<sup>3</sup>/s høyere ved finere oppløsning. Dette gjør at det registreres lengre varigheter for de høyeste målingene ved finere tidsoppløsningen enn de grovere døgnoppløsningene. Merk at når den nest største flommen er passert, registrerer den finere tidsoppløsningen en varighet som er dobbelt så lang som døgnverdiene. De rette strekene som oppstår ved høyere vannføring for døgnverdier, skyldes at det her registreres verdier fra den lineære interpolasjonen mellom målingene. Figur 44 og Figur 45 viser at antall overskridelser har en utflatende form. Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for ulike årsflommer er vist i Tabell 13. Den tilpassede linjen passer begge figurene godt. Tilpasset kurve for Lalm har formen:

$$y = 157 - 21 \cdot \log(x-500)$$

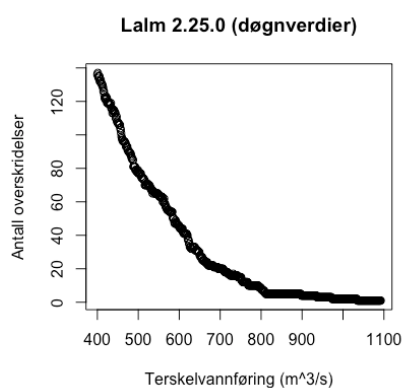
Ligning 13



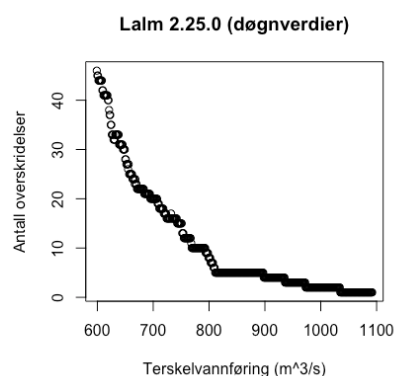
Figur 42: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm(døgnverdier) med tilpasset kurve.



Figur 43: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm(finere tidsopløsning) med tilpasset kurve.



Figur 44: Antall overskridelser for ulike terskelvannføring for Lalm.



Figur 45: Antall overskridelser for ulike terskelvannføring for Lalm. Figuren avbilder de høyeste terskelvannføringene.

Tabell 13: Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Lalm

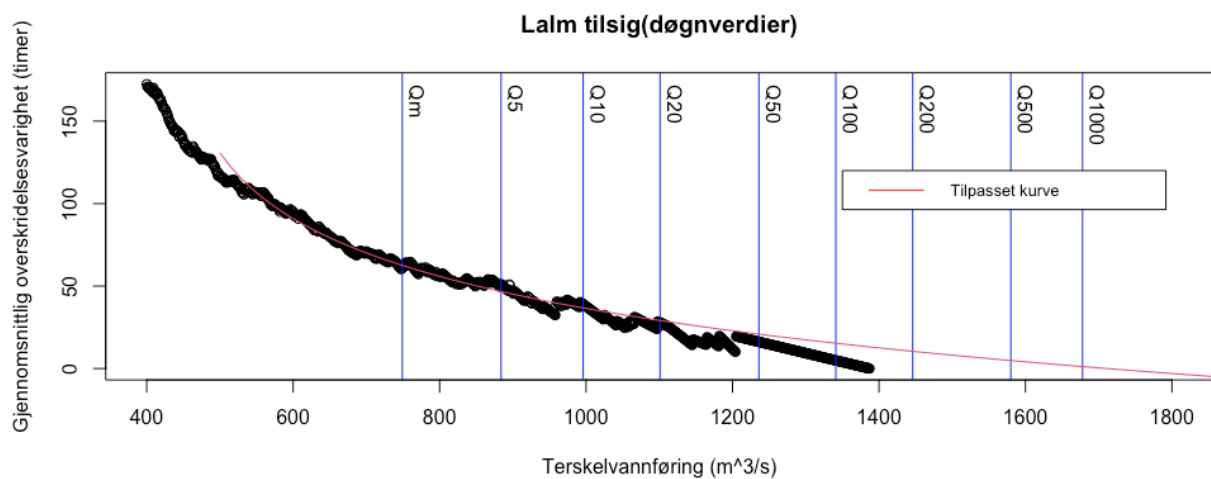
Varighet Lalm									
	Qm	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Varighet (timer)	46,9	35,4	29,3	24,6	19,9	16,9	14,3	11,3	9,3

### 5.1.2 Lalm tilsig

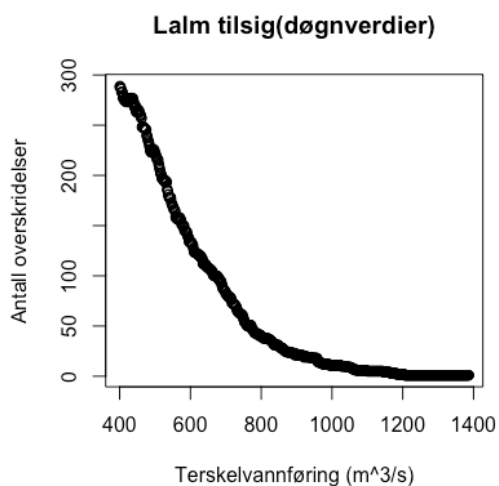
Figur 46 viser at den tilpassende kurven samsvarer godt med den registrerte gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten for Lalm tilsig. Vannføringsserien består av en lengre tidsperiode og har dermed registrert flere flommer enn Lalm. Den tilpassede kurven har derimot ikke samme utflatende form for de høyeste vannføringene, som kurven for Lalm. Fra Figur 47 og Figur 48 ser vi at de lavere returperiodene har relativt mange overskridelser, der returperioden på fem år har rundt 20 overskridelser. De utredede varighetene er vist i Tabell 14. Tilpasset kurve for Lalm tilsig har formen:

$$y = 322 - 45 \cdot \log(x - 430)$$

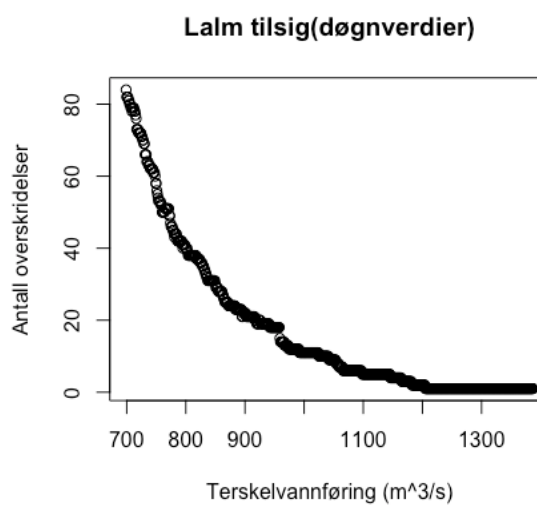
Ligning 14



Figur 46: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Lalm tilsig med tilpasset kurve



Figur 47: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Lalm-tilsig(døgnverdier)



Figur 48: Antall overskridelser for Lalm-tilsig(døgnverdier) for de høyere vannføringene.

Tabell 14: Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Lalm tilsig

Varighet Lalm tilsig									
	Qm	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Varighet (timer)	62,6	46,7	36,8	29,1	20,9	14,3	10,4	4,9	1,2

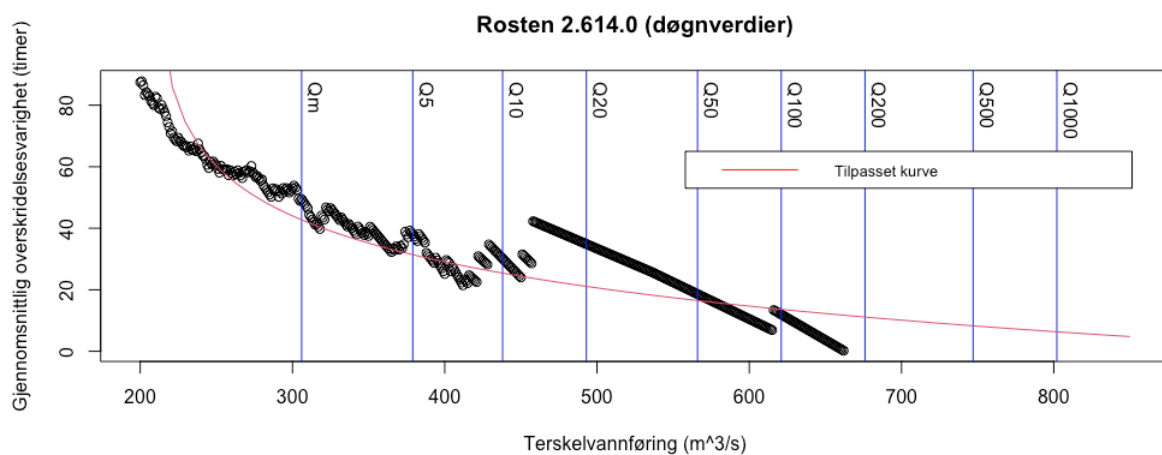
### 5.1.3 Rosten

Figur 49 og Figur 50 viser begge godt samsvar med den tilpassede kurven. Figur 49 indikerer en viss utflating etter 400m<sup>3</sup>/s, dette fanges ikke opp i den tilpassede kurven. Figur 51 og Figur 52 viser, som for Lalm, få overskridelser ved høye terskelvannføringer. Merk at det i Figur 52 er det et par områder der antall overskridelser øker med høyere terskelvannføring. Det er forsøkt å bruke et minimum-tidsintervall på 48 timer, noe som førte til at økningene i antall overskridelser forsvant. Dette utgjorde derimot ingen forskjell på Figur 49 og Figur 50. Tabell 15 viser de forskjellige gjennomsnittlige overskridelsesvarighetene for årsflommene i Rosten.

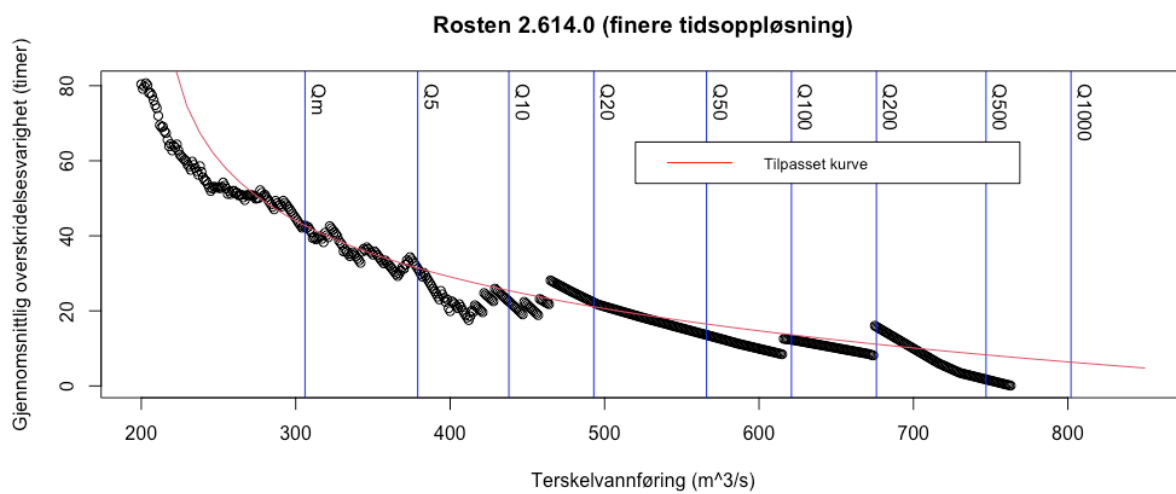
Tilpasset kurve for Rosten har formen:

$$y = 134 - 20 \cdot \log(x - 210).$$

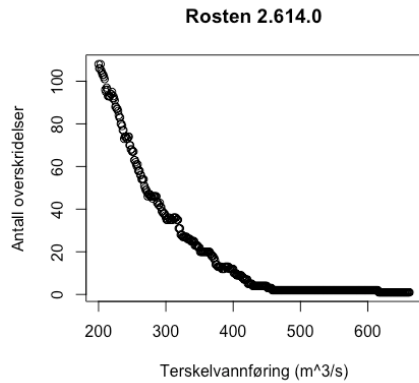
Ligning 15



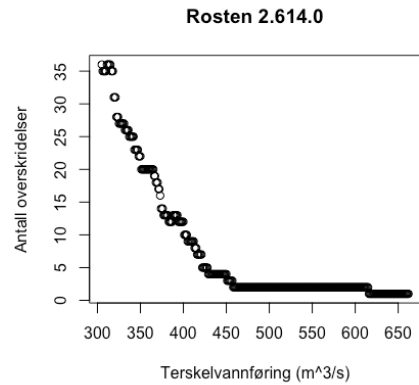
Figur 49: Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Rosten døgnverdier med tilpasset kurve



Figur 50 Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Rosten (finere tidsopløsning) med tilpasset kurve



Figur 51: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Rosten døgnverdier.



Figur 52: Antall overskridelser mot terskelvannføring for Rosten døgnverdier for høyere vannføringer.

Tabell 15 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Rosten

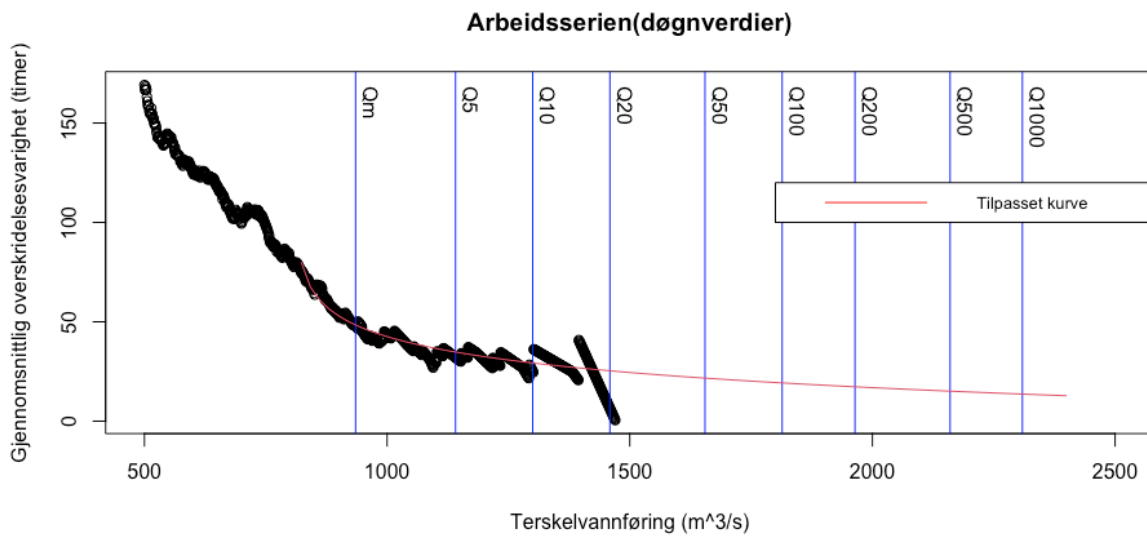
Varighet Rosten									
	Qm	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Varighet (timer)	42,7	31,4	25,4	21,1	16,5	13,6	11,1	8,3	6,3

#### 5.1.4 Arbeidsserien

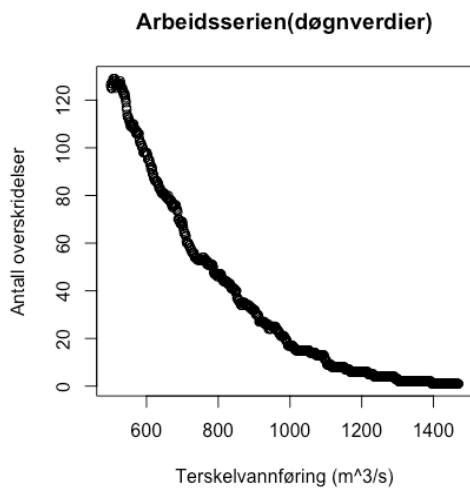
Figur 53 viser en tydelig utflating av den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten. Dette fører til relativt lange varigheter for de høyere returperiodene, se Tabell 16. Figur 54 og Figur 55 viser mellom 5 og 10 overskridelser for de laveste returperiodene. Tilpasset linje har formen:

$$y = 116 - 14 \cdot \log(x-810)$$

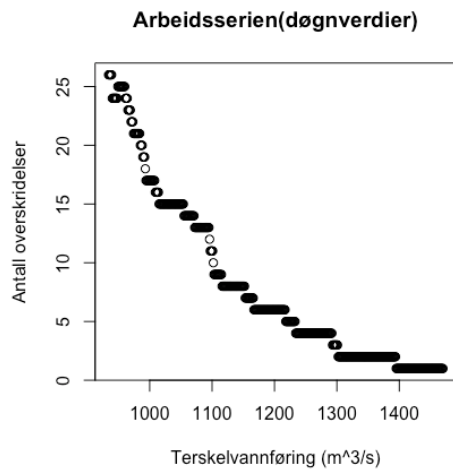
Ligning 16



Figur 53 Gjennomsnittlig overskridelseslengde for Arbeidsserien døgnverdier med tilpasset kurve



Figur 54 Antall overskridelser ved ulike terskelvannføring for Arbeidsserien(døgnverdier).



Figur 55 Antall overskridelser ved ulike terskelvannføring for Arbeidsserien(døgnverdier) for høyere terskelvannføringer.

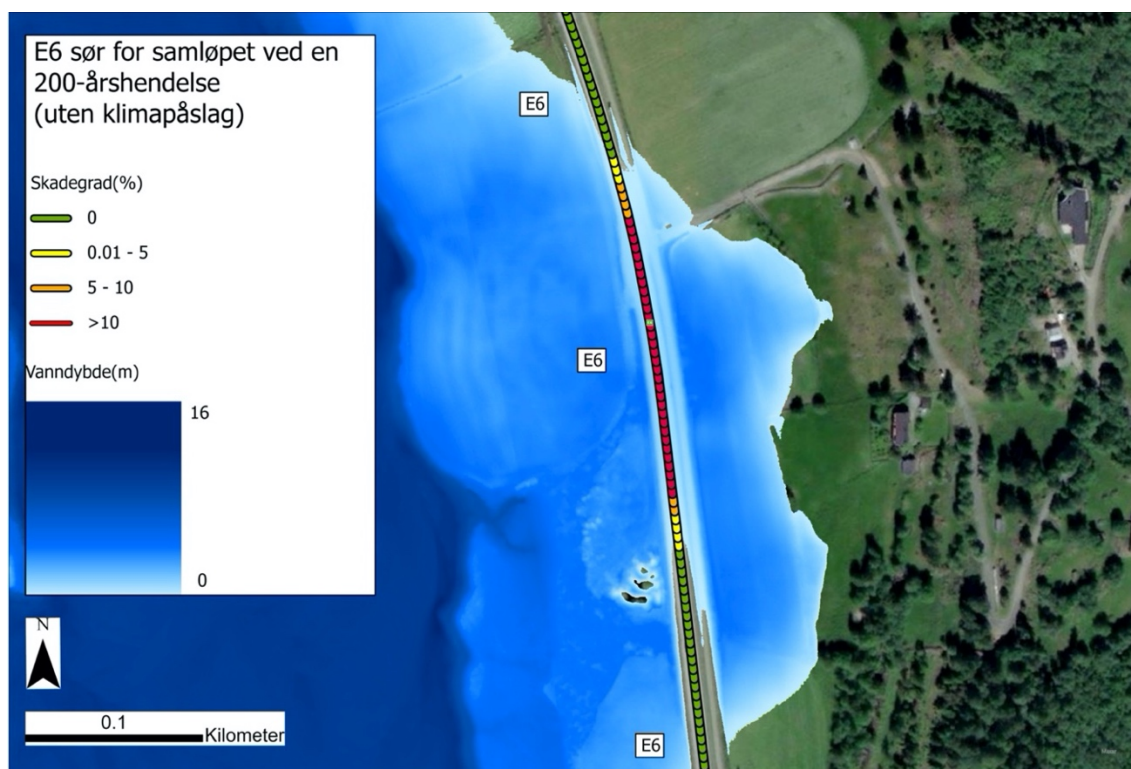


Tabell 16 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene for Arbeidsserien.

Varighet Arbeidsserien									
	Qm	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Varighet (timer)	48,4	34,8	29,3	25,3	21,6	19,2	17,3	15,1	13,6

## 5.2 Direkte konsekvenser av flom på infrastrukturen

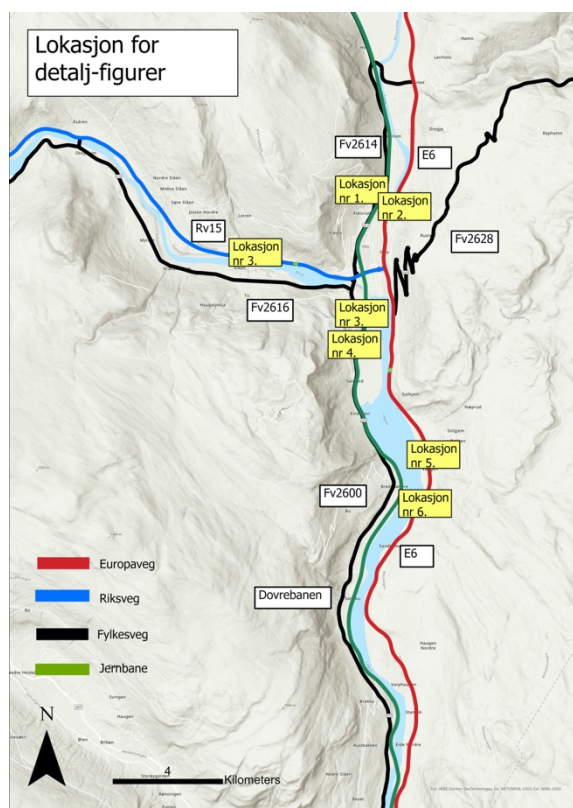
Figur 56 viser hvordan de simulerte farekartenes høye romlige oppløsning gjøre det mulig å undersøke i detalj hvordan infrastrukturen påvirkes av flom. Figur 56 viser hvordan modellen greier å skille mellom den opphøyde veien og det lavere-liggende landskapet rundt.



Figur 56: E6 ved en 200-årsflomhendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.5» i Figur 57

Dette kapittelet inneholder flere figurer som viser utvalgte deler av studieområdet.

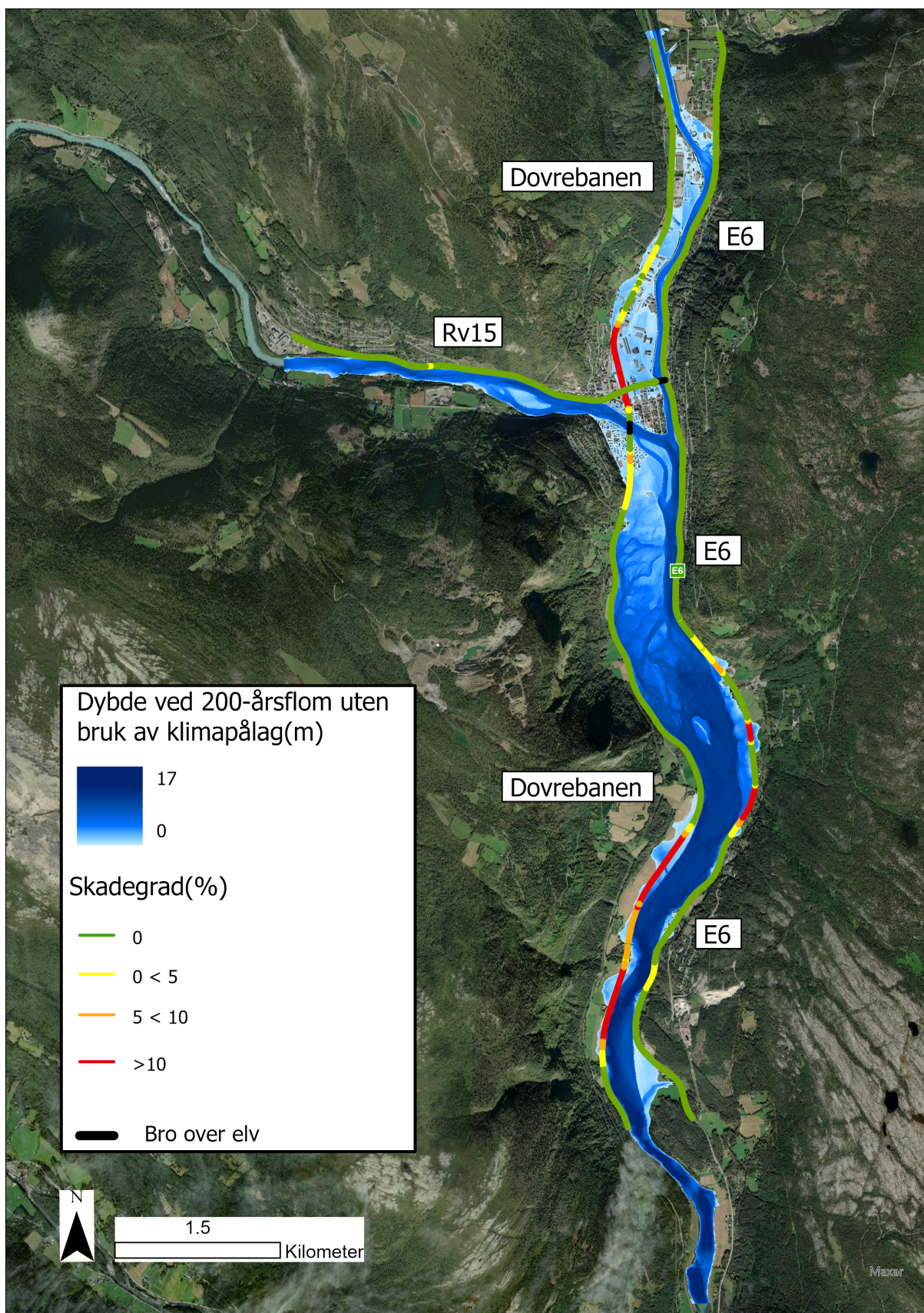
Lokasjonen til disse detaljområdene vises i Figur 57.



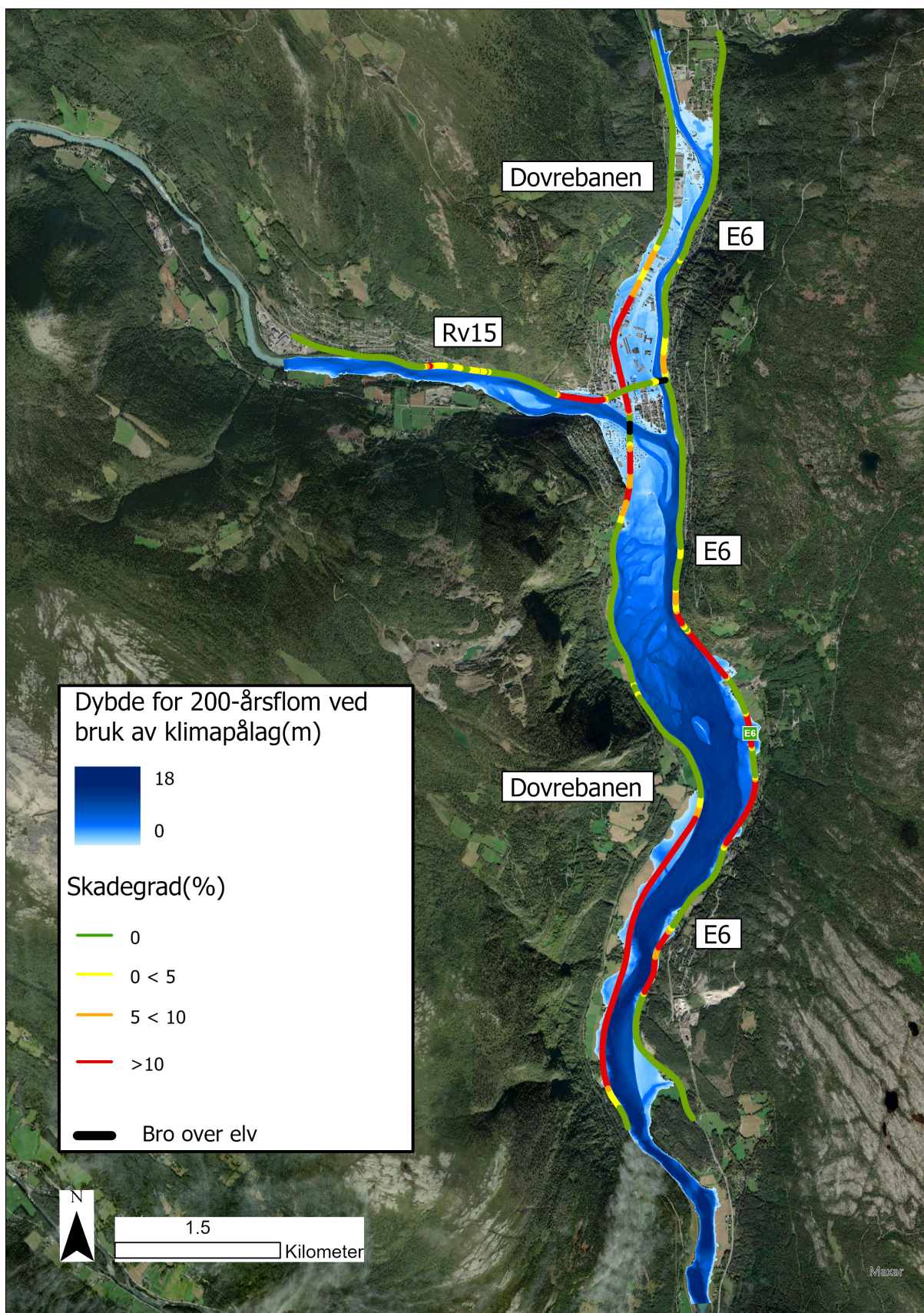
Figur 57: Lokasjon for detalj-figurer.

### 5.2.1 Skadegrad ved 200-årsflom

Figur 58 og Figur 59 viser hvordan infrastrukturen er beregnet rammet av 200-årshendelse, henholdsvis uten og med klimapåslag. Rv15 blir så vidt oversvømt av en 200-årshendelse (uten-klimapåslag) (Figur 58), men blir rammet betydelig hardere når det er benyttet klimapåslag (Figur 59). I sentrum går Rv15 i bro over Dovrebanen, noe som gjør at Rv15 her ikke rammes i samme grad som Dovrebanen. Dovrebanen blir hardt rammet av en 200-årsflom, både med og uten klimapåslag, det gjelder både sør og nord for samløpet. For E6 oppstår det relativt stor skadegrad over større strekninger sør for samløpet, med og uten klimapåslag. Nord for samløpet rammes E6 kun når det er benyttet klimapåslag, og da i relativt liten grad.



Figur 58: Skadegrad på infrastrukturen i studieområdet ved en 200-årsflom (uten klimapåslag).



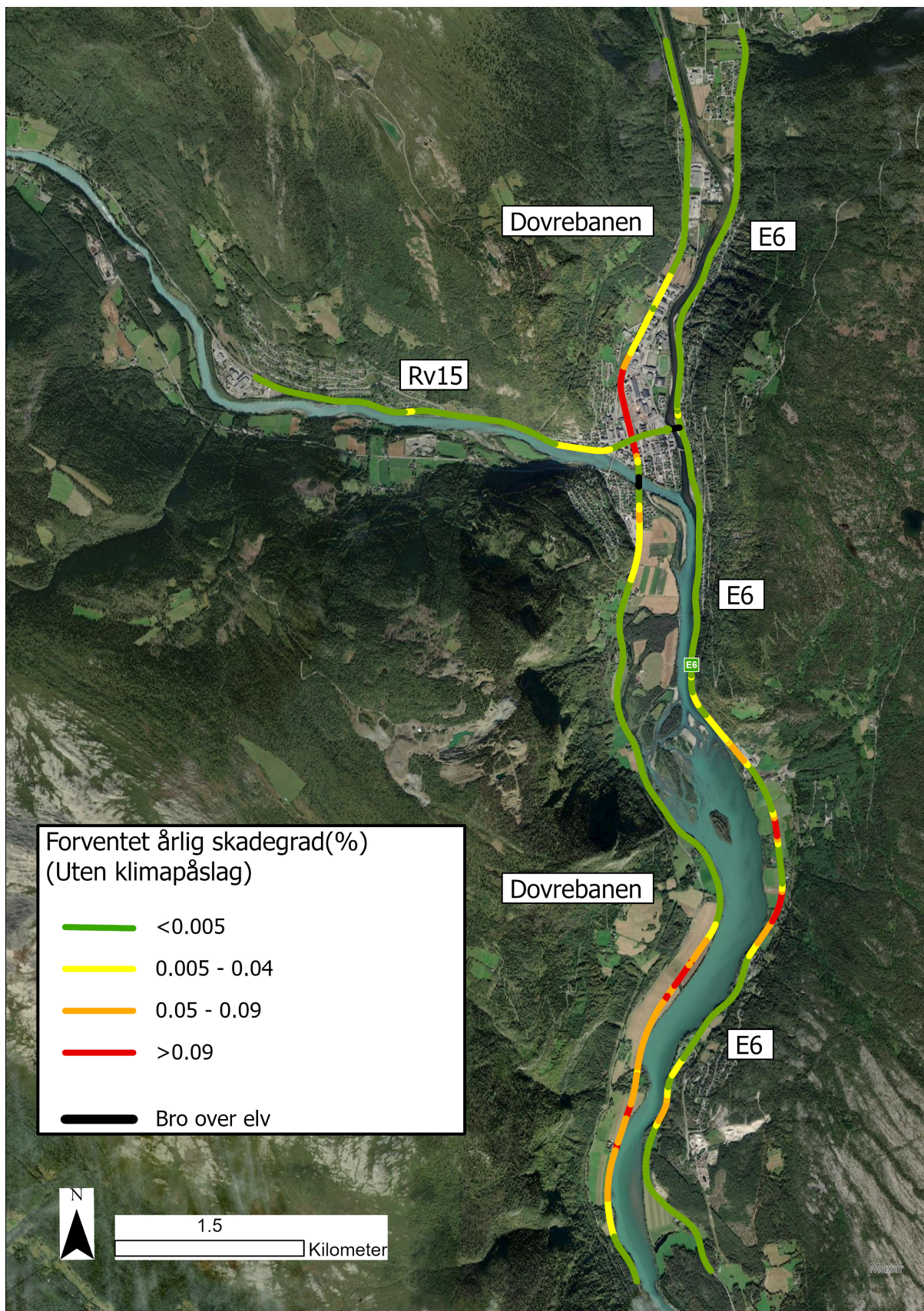
Figur 59: Skadegrad på infrastrukturen i studieområdet ved en 200-årsflom (med klimapåslag).

### 5.2.2 Forventet årlig kostnad

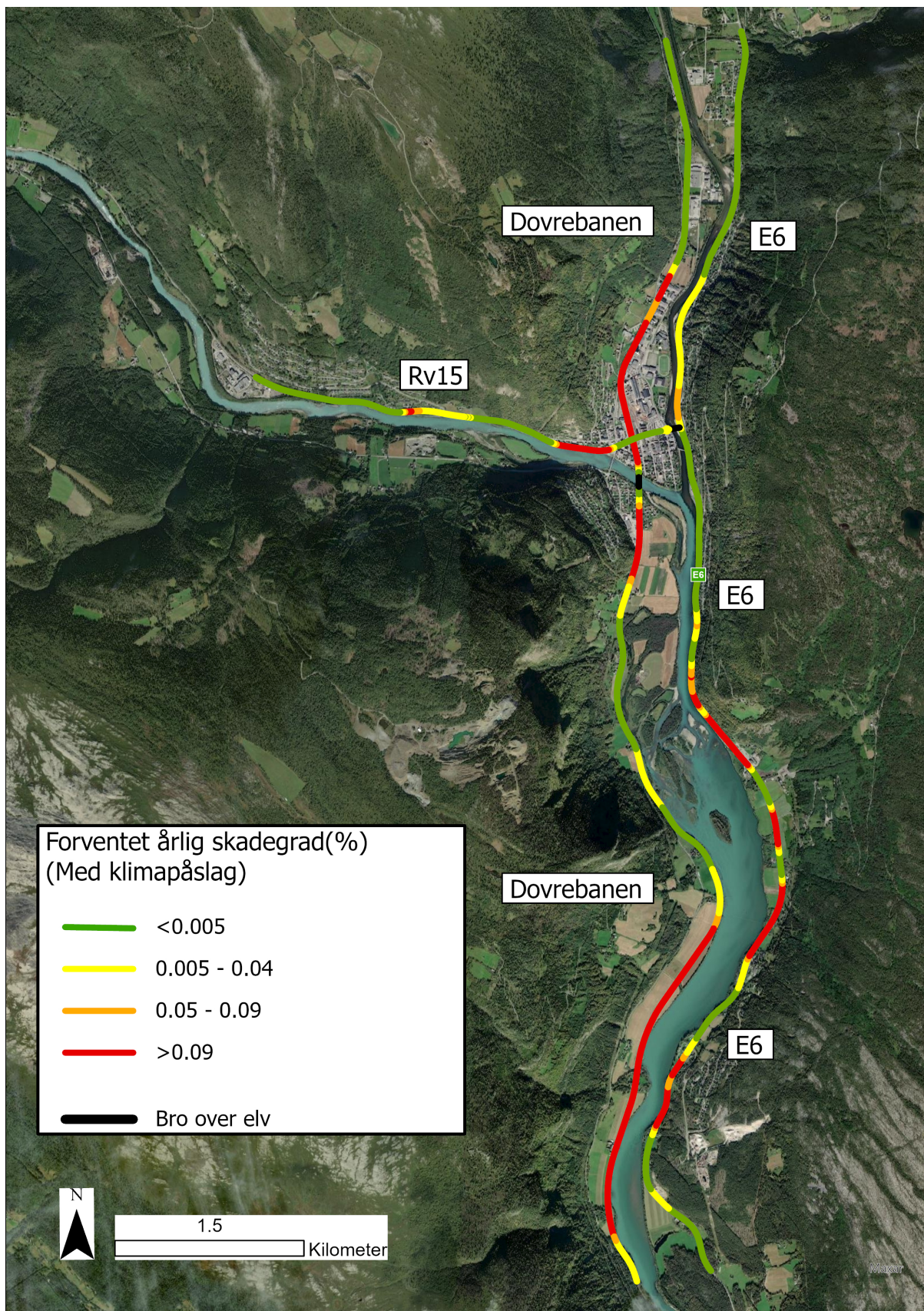
Figur 60 og Figur 61 viser forventet årlig skadegrad for studieområdet, henholdsvis uten og med klimapåslag. E6, Rv15 og Dovrebanen viser alle tre en stor økning i forventet skadegrad ved bruk av klimapåslag. Figur 60 viser at E6 nord for samløpet og Rv15 beregnes å ha lavt skadepotensial når det ikke er benyttet klimapåslag. Dovrebanen og E6 sør for samløpet har stor forventet skadegrad både med og uten klimapåslag. Det er valgt å inkludere forventet årlig skadegrad for best å kunne illustrere forskjellen i skadegrad mellom jernbane og veg, uten at usikkerheten rundt meterpris skal påvirke sammenligningen. Fra Figur 62 ser vi at det er E6 og jernbanen som har de største kostnadene. Estimater for forventet årlig kostnad er vist i Tabell 17. Tabell 18 viser kostnad på infrastrukturen ved ulike årsflommer.

Tabell 17: Forventet årlig skadegrad og forventet årlig kostnad for infrastrukturen i studieområdet, med og uten klimapåslag.

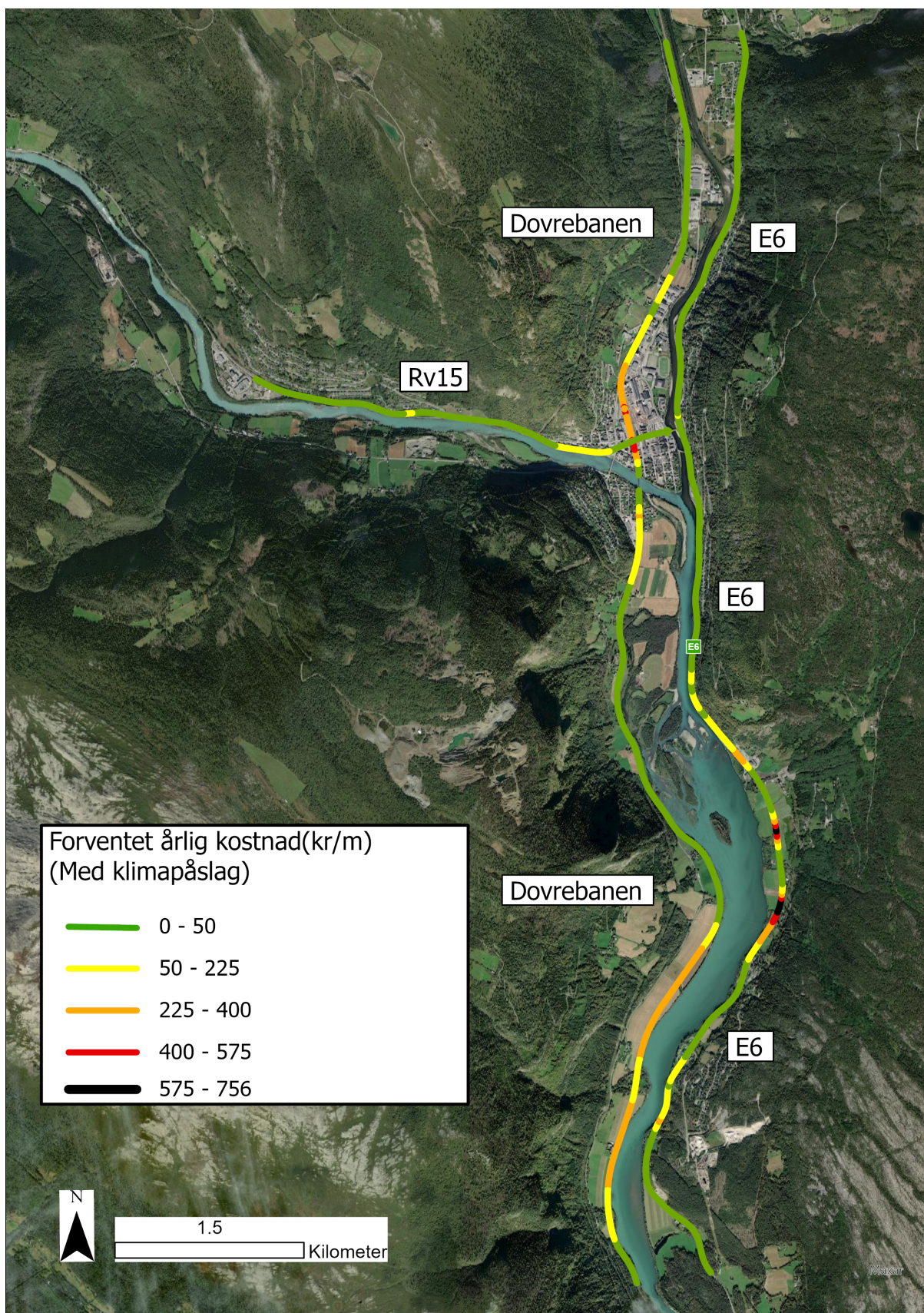
	Forventet årlig kostnad (kr)
E6	95 170
E6 (med klimapåslag)	604 071
Rv15	6 661
Rv15 (med klimapåslag)	59 859
Dovrebanen	214 308
Dovrebanen (med klimapåslag)	1 087 239
Totalt for infrastrukturen (uten klimapåslag)	316 139
Totalt for infrastrukturen (med klimapåslag)	1 751 169



Figur 60: Figuren viser forventet årlig skadegrad på vei og jernbane i studieområdet. Basert på farekart som er beregnet uten klimapåslag.



Figur 61: Figuren viser forventet årlig skadegrad på vei og jernbane i studieområdet. Basert på farekart som er beregnet med klimapåslag.



Figur 62: Figuren viser forventet årlig kostnad (kr/m) som følge av direkte skader på infrastrukturen i studieområdet. Figuren er basert på flomstørrelser som har benyttet klimapåslag.



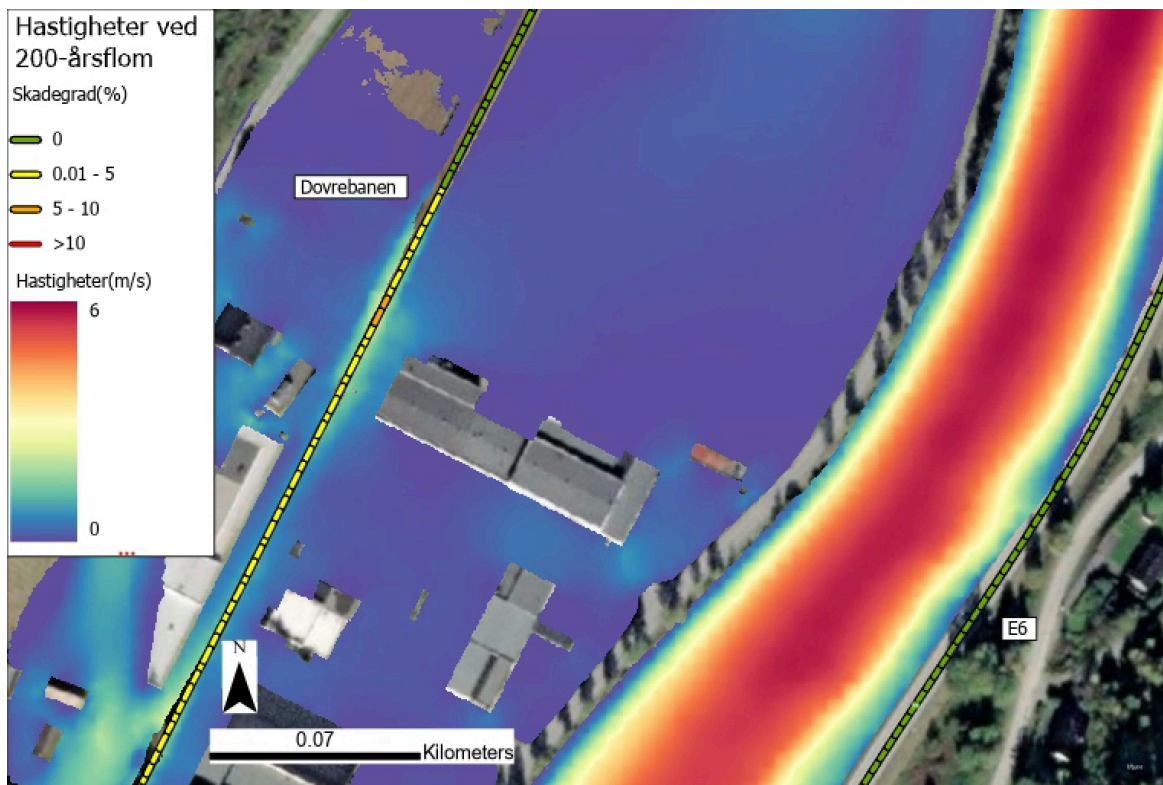
Tabell 18: Tabellen viser totalkostnad for infrastrukturstrøkningene ved ulike hendelser.

Totalkostnad(kr) tilknyttet de forskjellige returperiodene (med klimapåslag)				
Returperiode(år)	Rv15	E6	Dovrebanen	Totalt
10	0	0	76 478	76 478
20	0	780 485	424 858	1 205 343
50	0	8 299 066	26 936 141	35 235 207
100	3 113 943	32 317 724	62 803 713	98 235 380
200	5 606 308	49 965 407	78 356 736	133 928 451
500	11 163 665	73 120 385	105 198 794	189 482 844
1000	16 306 783	113 061 324	142 011 539	271 379 646

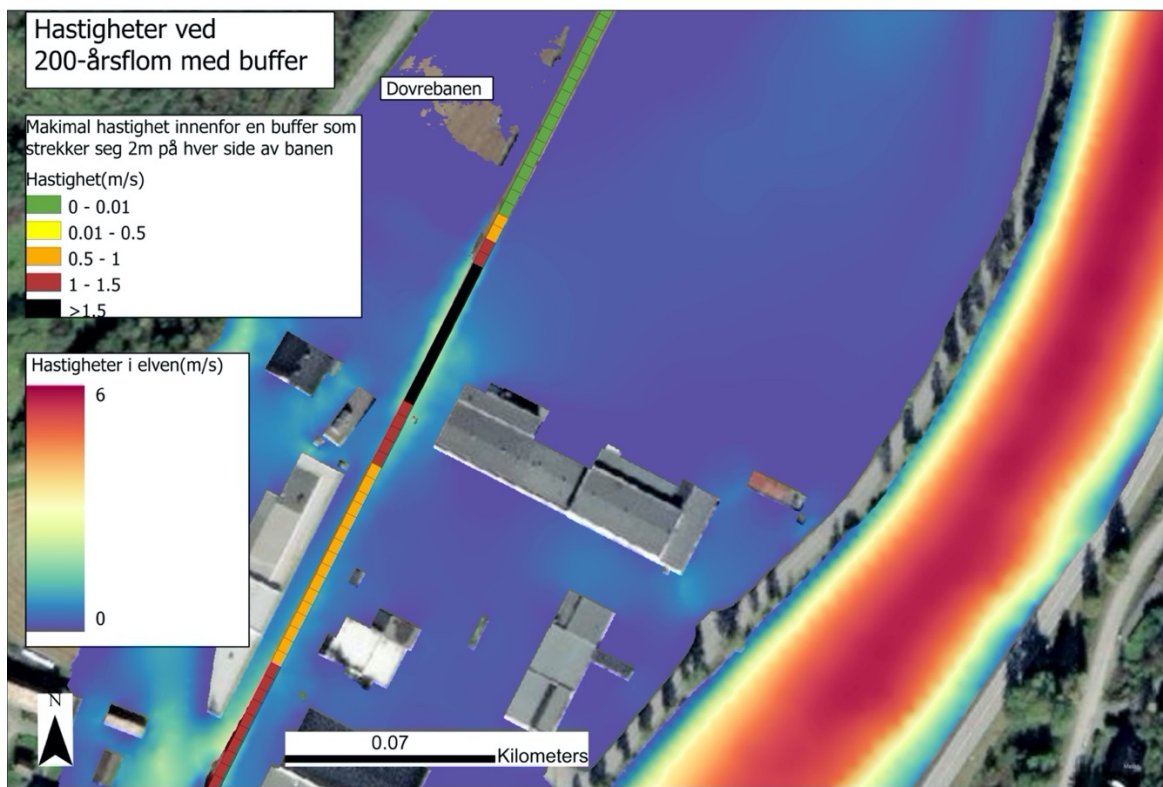
### 5.2.3 Vurdering av skadefunksjoner ved bruk av buffer og hastighetskart

I Figur 63 - Figur 66 er vannhastigheter ved to ulike lokaliteter vist for en 200-årsflom(uten klimapåslag), se Figur 57 for plasseringsoversikt. Figurene er laget for å undersøke egnetheten til de benyttede skadefunksjonene. Det er to faktorer som figurene illustrerer:

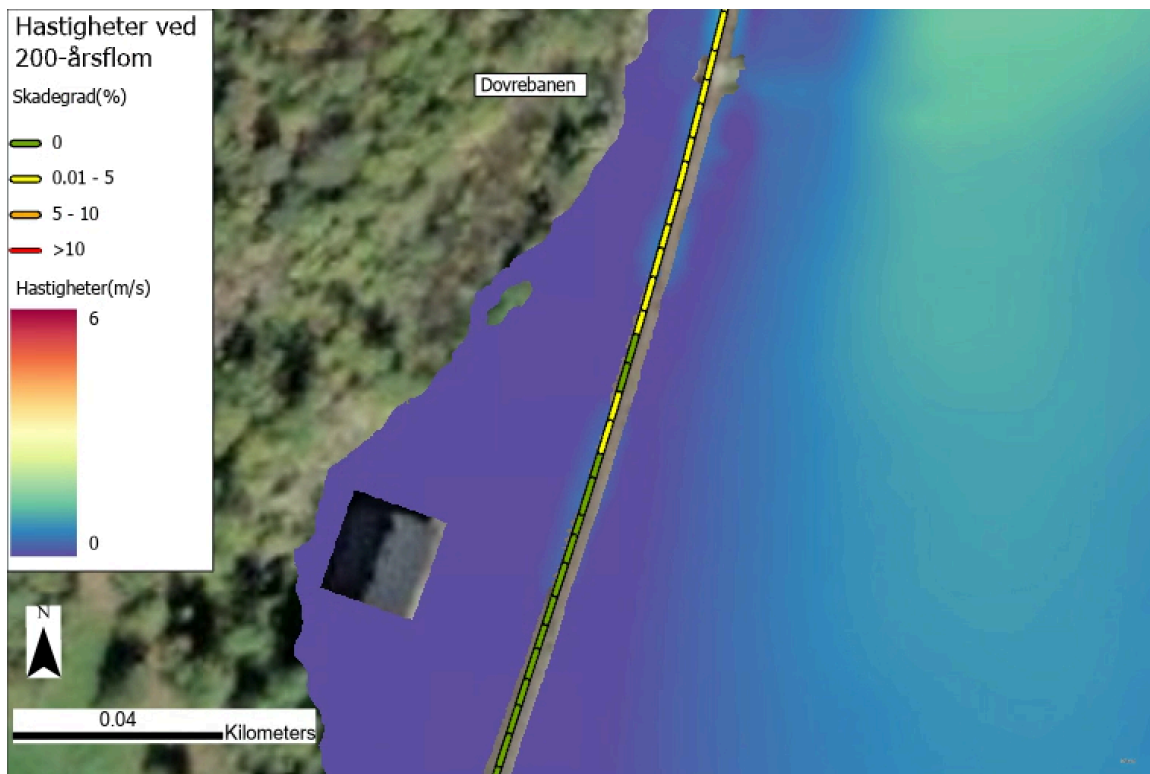
1. Skadefunksjonene benyttet i oppgaven er basert på senterlinjen til infrastrukturen, noe som gjør at det ikke registreres skade når senterlinjen ikke er dekket av vann. Fra Figur 65 ser en at det er registrert null skadegrad selv som infrastrukturen er dekket av vann på begge sider senterlinjen. Dette fanges imidlertid opp i Figur 66 som registrerer vannhastigheter når det er benyttet en buffer på 2m ut fra senterlinjen til jernbanen.
2. Skadefunksjonene benyttet i oppgaven er basert på vanddybde. Vannhastighet er en faktor som kan påvirke skade. I Figur 64 og Figur 66 er det benyttet en buffer som registrerer maksimale hastigheter. For begge tilfellene er hastighetene relativt lave. For Figur 66 som ligger langt unna elven, er hastighetene under 1 m/s. Fra figurene ser vi at det oppstår lokalt høyere hastigheter flere steder langs banen.



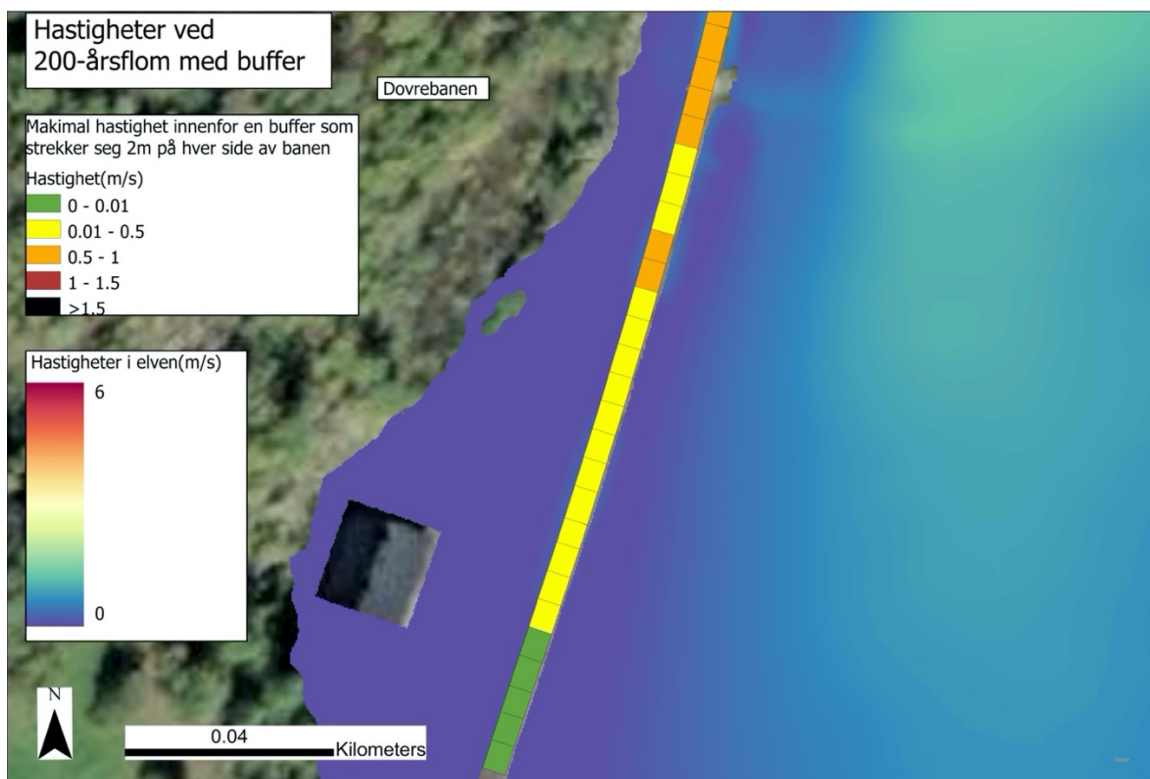
Figur 63: Hastighetskart for 200-årsflom(uten klimapåslag) med skadegrad på infrastrukturen. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.1» i Figur 57



Figur 64: Hastighetskart med registrerte maksimal hastighet innenfor en buffer som strekker seg 2 meter til hver side av jernbanen. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.1» i Figur 57



Figur 65: Hastigheter ved 200-årsflom sammen med skadegrad. Oppe på flomsletten sør for samløpet. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.4» i Figur 57



Figur 66: Hastighetskart med registrerte maksimal hastighet innenfor en buffer som strekker seg 2 meter til hver side av jernbanen. Oppe på flomsletten sør for samløpet. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.4» i Figur 57

## 5.3 Indirekte konsekvenser knyttet til stenging av infrastrukturen

### 5.3.1 Stenging av infrastruktur

Tabell 19 viser hvilke veier som beregnes å måtte stenge ved ulike flomhendelsene i studieområdet. De tre alternative veiene i studieområdet, Fv2616, Fv2614 og Fv2600, stenger alle før eller samtidig som hovedveiene, og de vil derfor ikke kunne benyttes som alternativ vei for hovedveiene. Beregninger viser også at all infrastrukturen registrer stenging ved lavere returperiode når det er benyttet klimapåslag.

Tabell 19: Stenging av infrastruktur ved ulike flomhendelser.

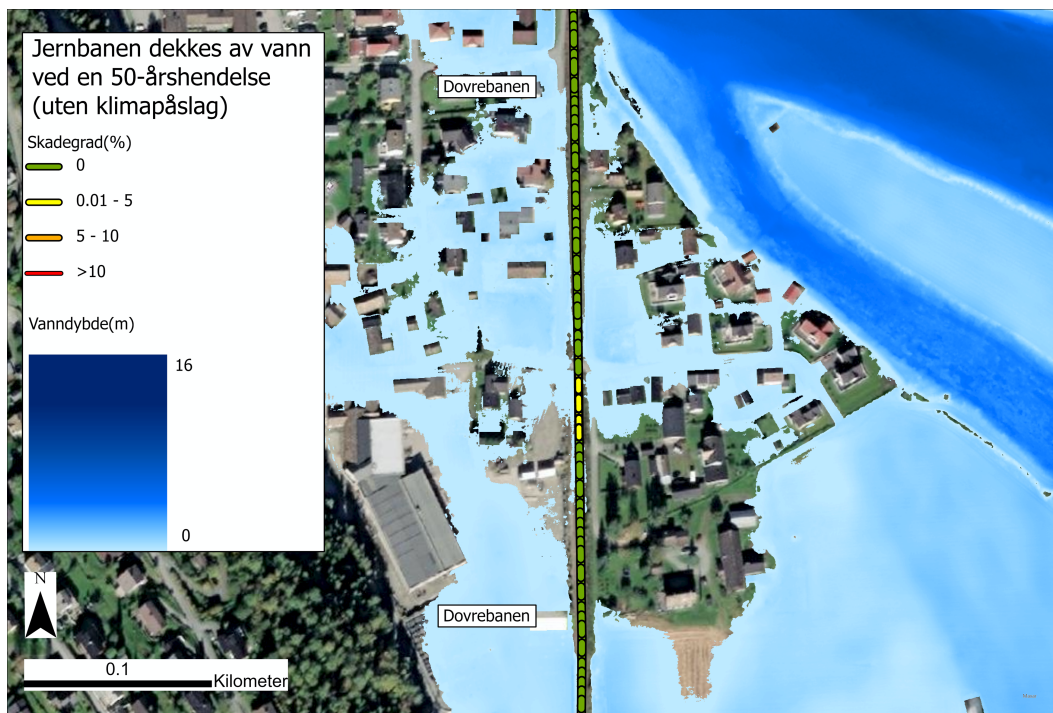
Stenging av infrastruktur									
Åpen infrastruktur, åpen uten klimapåslag og stengt med klimapåslag, stengt infrastruktur									
	QM	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000
Jernbanen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
Rv15	Åpen	Åpen	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
Fv2616	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
E6(nord)	Åpen	Åpen	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
Fv2614	Åpen	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
E6(Sør)	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt
Fv2600	Åpen	Åpen	Åpen	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt	Stengt

Nedenfor i dette delkapittelet er de ulike punktene der infrastrukturen stenges vurdert. Det er valgt å inkludere skadegrad i figurene for å gi en indikasjon på graden av oversvømmelse. Ved å inkludere skadegraden, vil en også kunne sammenligne figurene med de modellerte skadekartene (Figur 58 og Figur 59). Samtidig vil det gi en god oversikt over hvilke områder

som er dekket av vann, der infrastruktur markert med grønt indikerer at området ikke er dekket, og gult, oransje og rødt gir at infrastrukturen er dekket av vann i økende grad.

Jernbanen beregnes å stenge ved flomnivå tilsvarende en 50-årshendelse (uten klimapåslag) (Tabell 19). Det svake punktet som fører til stenging, er vist i Figur 67, her er det en marginal oversvømmelse av senterlinjen til jernbanen. Ved en 50-årshendelse er jernbanen dekket med vann på begge sider av banen på flere steder (Figur 67). De modellerte farekartene med klimapåslag viser at banen stenges allerede ved en 10-årshendelse (Figur 68).

Sammenligning av Figur 67 og Figur 68 viser at området beregnet som en 10-årshendelsen med klimapåslag, gir tilnærmet farekart rundt det svake punktet som en 50-årshendelsen uten klimapåslag.

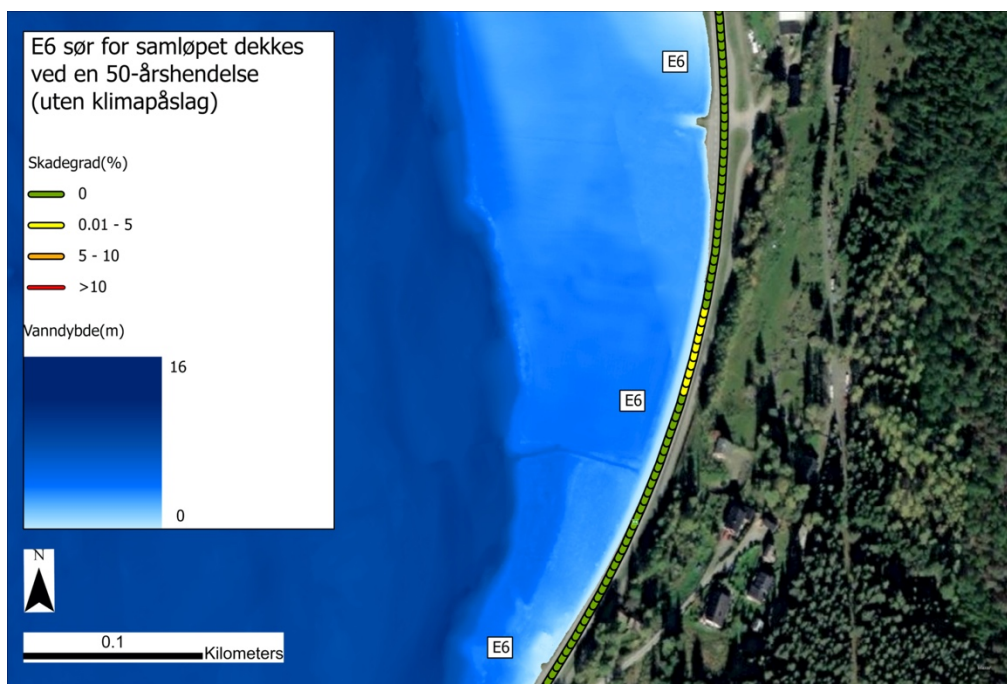


Figur 67: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 50-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på jernbanen som vil føre til at jernbanen stenger ved en 50-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.



Figur 68: Figuren viser vanndyp og skadegrad ved en 10-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på jernbanen som vil føre til at jernbanen stenger ved en 10-årshendelse. Det svake punktet er illustrert med gul fargekode. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.

E6 sør for samløpet vil måtte stenges ved en 50-årsflom(uten klimapåslag) (Tabell 19). Det sårbare punktet som dekkes ved en slik flomstørrelse er vist i Figur 69. Ved hendelsen er ikke hele veibanen dekket av vann, og senterlinjen er marginalt oversvømt. Dette indikerer at veien vil være åpen ved en returperiode som er litt kortere enn 50 år. Med klimapåslag stenges veien ved en 20-års hendelse, og den oversvømmes flere steder. Figur 70 viser et svakt punkt på E6, sør for samløpet, ved en 20-årsflommen. Veien dekkes da av vann i større grad enn i Figur 69, og det registreres skadegrad på over 5%. Dette indikerer at veien vil være stengt for en hendelse som har en del kortere returperiode. Farekartet for 10-årshendelse(med klimapåslag) bekrefter dette, her er veien så vidt ikke dekket.



Figur 69: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 50-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 sør for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 50-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.6» i Figur 57.



Figur 70: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 20-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt som vil føre til at E6 sør for samløpet stenger ved en 10-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.6» i Figur 57.

Figur 71 viser omfanget av oversvømmelse på Rv15 under en 200-årsflom(uten klimapåslag). Veien oversvømmes på ett område, her er hele veien dekket av vann, og maksimal vannhøyde på veien er 10cm. Den lave dekningsgraden antyder at veien vil være åpen ved litt lavere vannføringer. Ved bruk av klimapåslag blir veien dekket ved en 100-årshendelse. Veien dekkes da på flere steder, blant annet på lokasjonen vist i Figur 72. Fra Figur 72 ser en at det oppstår skadegrad på over 5%, noe som indikerer at vegen dekkes i stor grad. Dette indikerer at veien vil være dekket vann også ved en god del lavere vannføringer.



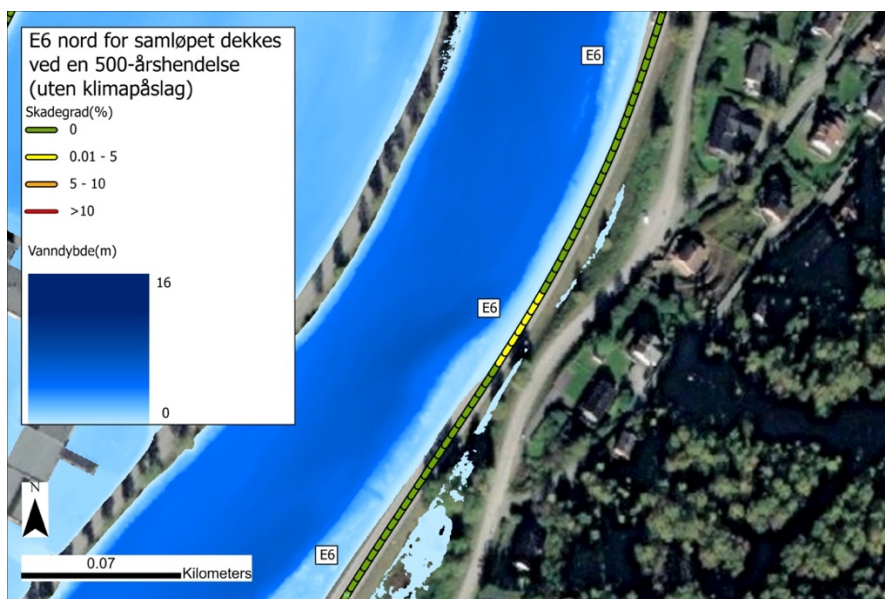
Figur 71: Figuren viser vanddyb og skadegrad ved en 200-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på Rv15 som vil føre til at veien stenger ved en 200-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.



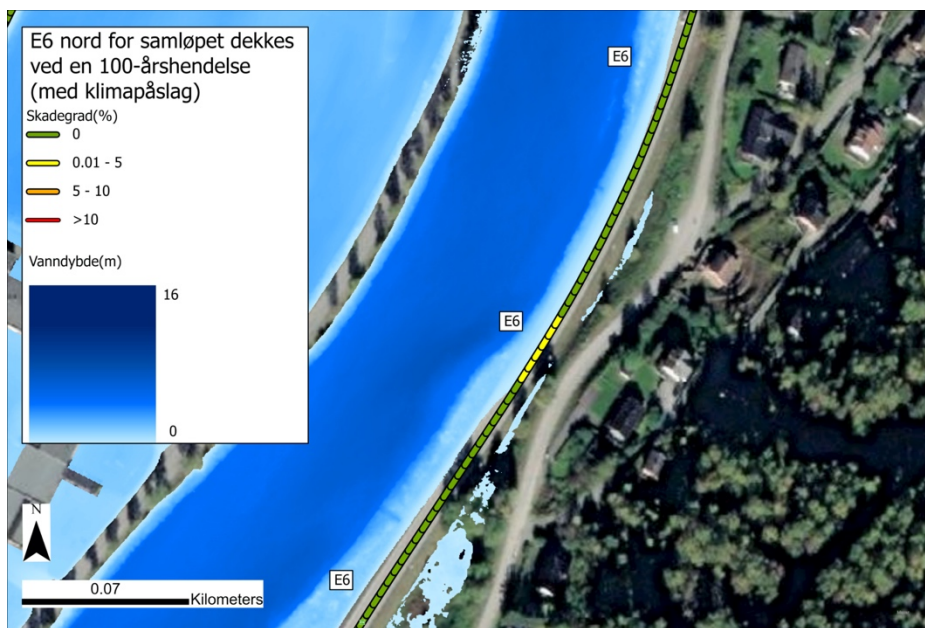


Figur 72: Figuren viser vannndyp og skadegrad ved en 100-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på Rv15 som vil føre til at veien stenger ved en 100-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.3» i Figur 57.

Figur 73 og Figur 74 viser at E6 nord for samløpet så vidt er dekket ved henholdsvis 500-årsflom(uten klimapåslag) og 100-årsflom(med klimapåslag). Ved alle lavere returperioder er veiene åpne. Ved så lav dekningsgrad vil returperioden gi en god indikasjon på hvor ofte veien vil være stengt. De to farekartene i Figur 73 og Figur 74 viser en nesten identisk vannutbredelse. Dette betyr at en 500-årsflom(uten klimapåslag) vil ha et tilsvarende farekart som en 100-årsflom(med klimapåslag).



Figur 73: Figuren viser vannndyp og skadegrad ved en 500-årshendelse (uten klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 nord for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 500-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.2» i Figur 57.



Figur 74: Figuren viser vanndyb og skadegrad ved en 100-årshendelse (med klimapåslag). Illustrert er et svakt punkt på E6 nord for samløpet som vil føre til at veien stenger ved en 100-årshendelse. Lokalisering til figuren er markert som «lokasjon nr.2» i Figur 57.

### 5.3.2 Indirekte kostnader

Ved utregning av kostnader er det brukt farekart som ikke har benyttet klimapåslag. Dette er gjort for å kunne koble stengetid på infrastrukturen til varighetsanalysen som ikke har benyttet klimapåslag. Nedenfor i delkapittelet er alle flomhendelser omtalt knyttet til farekartene uten klimapåslag.

For omkjøring knyttet til veiene har det vært nødvendig å vurdere de antatte reiserutene opp mot farekartene. De ulike reiserutene er skissert i Figur 41.

- Den hovedveien som stenger ved det laveste gjentaksintervall, er E6 sør for samløpet. Den stenger ved en 50-årshendelse (Figur 69). Opprinnelig var det antatt at omkjøring for trafikantene på E6 sør for samløpet skulle gå fra Sjoa til Otta via Lalm. Imidlertid gir omkjøring fra Sjoa via Lalm til Sel lavere ekstrakostnader (Tabell 20), og denne er derfor benyttet i beregningene.
- Rv15 stenges først ved en 200-årshendelse (Figur 71). Omkjøringsruten blir da fra Lalm til Otta via Sel. Ekstra kjøredistanse, tid og kostnader er listet i Tabell 20.

- E6 nord for samløpet stenger ved en 500-årshendelse(Figur 73). Det er ikke beregnet omkjøring for E6 nord for samløpet. I de tilfeller der E6 nord for samløpet må stenges, vil alle andre veier inn til studieområdet allerede være strengt. I et slikt scenario vil ikke metoden for beregning av kostnader være egnet, og det er derfor sett bort i fra stenging av E6 nord for samløpet. Scenarioet er diskutert i diskusjonsdelen.

Tabell 20: Omkjøringskostnader for hovedveiene i studieområdet.

	Omkjøring	Ekstra kjøredistanse	Ekstra reisetid	Kostnad per time stengt
E6-sør	Fra Sjoa til Otta via Lalm	33,68km	34,63min	83898kr/time
E6-sør	Fra Sjoa til Sel via Lalm	38,4km	31min	80362kr/time
Rv15	Fra Lalm til Otta via Sel	19,3km	16min	21662kr/time
Jernbanen	Buss for tog		40min	9159kr/time

For utregning av kostnadene knyttet til omkjøring ved Ligning 11 og Ligning 12, er det nødvendig at varigheten på stengingen er kjent. Disse verdiene er hentet fra varighetsanalysen. Varighetene gir midlere stengetid for hver gang infrastrukturen er stengt. Følgende er vurdert:

- E6-Sør: Arbeidsserien representerer forholdene nedenfor samløpet. Denne vannføringsserien gir en gjennomsnittlig overskridelsesvarighet på 21,6t for en 50-årshendelse (Tabell 16).
- Rv15: Den vannføringsserien som best representerer forholdene ved en 200-årshendelse oppe i Otta-dalen (lokasjon nr.3 i Figur 57) er tilsigserien. Tabell 14 viser

at gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for en 200-årshendelse er 10,4 timer. Det er her benyttet tilsigserien for å minimere feilkilder knyttet til regulering.

- Jernbanen: Ved en 50-årshendelse blir jernbanen oversvømt rett sør for Jernbanebrua (Figur 67). Dette er i et området der både Lågen og Otta vil ha en effekt, men Otta vil ha det dominerende bidraget. Det er valgt å bruke serien til Lalm. Fra Tabell 13 gir dette en gjennomsnittlig overskridelsesvarighet på 19,9 timer for en 50-årshendelse.

Kostnadene beregnet for omkjøring ved flom, er listet i Tabell 21. Ved for eksempel E6 sør for samløpet, viser Tabell 21 at det laveste gjentakintervallet der veien dekkes av vann, er 50 år. Det vil si at banen i snitt dekkes en gang hvert 50. år, eller at det er en sannsynlighet på 2% for at veien dekkes et gitt år. Fra varighetsanalysen vet vi at 50-årsvannføringen i snitt blir overskredet i 21,6 timer. Det vil si at veien dekkes i gjennomsnitt i 21,6 timer hver gang den er oversvømt. Kostnadsestimatet gir dermed en midlere kostnad for hver gang veien er dekket, noe som skjer hvert 50. år.

Tabell 21: Kostnad for omkjøring.

	Laveste flomstørrelse der stenging forekommer	Omkjøring	Kostnad per time stengt	Varighet	Kostnad
Rv15	200-årshendelse	Lalm til Otta via Sel	21662 kr/t	10,4t	225 285kr
E6-Sør	50-årshendelse	Sjoa til Sel via Lalm	80362 kr/t	21,6t	1 735 819kr
E6-Nord	500-årshendelse				
Jernbanen	50-årshendelse	Buss for tog	9159 kr/t	19,9t	182 264kr

Det er mulig å beregne forventet årlig kostnad ut fra resultatene i Tabell 20. Siden omkjøringsrutene til Rv15 og E6 ikke sammenfaller noe med den andre veiens flomutsatte områder, vil disse to ikke ha noen innvirkning på hverandre. Omkjøring knyttet til stenging av Rv15 gir i snitt en kostnad på 225 285kr (Tabell 21). Dette har en sannsynlighet for å forekomme et år på 0.5%, noe som gir en forventet årlig kostnad på 1126,4 kr. For

omkjøring knyttet til stengt vei på E6 sør for samløpet kan en forvente en årlig kostnad på 34 716kr. For jernbanen gir tilsvarende en forventet årlig kostnad på 3 645kr.

Kostnadene ovenfor er basert på hvor lenge infrastrukturen er dekket av vann. Skader og reparasjoner vil føre til at infrastrukturen vil måtte være stengt i en viss periode etter en flomhendelse. Tabell 22 viser kostnadsomfanget ved forskjellige nedetider.

Tabell 22: Eksempel på indirekte kostnader knyttet til ulike nedetider. Kostnadsformler hentet fra Tabell 20.

Nedetid	Kostnad		
	Rv15	E6 – sør for samløpet	Jernbanen
5 dager	2,6 mill. kr	9,6 mill. kr	1,1 mill. kr
7 dager	3,6 mill. kr	13,5 mill. kr	1,5 mill. kr
14 dager	7,3 mill. kr	27,0 mill. Kr	3,1 mill. kr
21 dager	10,9 mill. kr	40,5 mill. kr	4,6 mill. kr

## 6 Diskusjon

I diskusjonen vil jeg fokusere på antagelsene som ligger til grunn for de ulike modellene. Ved å drøfte antagelsene, oppnås en større forståelse for hvordan de ulike faktorene styrer konsekvensene som følge av flom har på infrastruktur. Her gjelder særlig de lokale momentene i studieområdet. Dette vil videre kartlegge hvilket bruksområdet modellene har og anvendbarheten til disse, samt mulige forbedringer.

### 6.1 Gjennomsnittlig overskridelsesvarighet

Resultatene fra varighetsanalysen gir informasjon om hvor lenge en vannføring i gjennomsnitt er overskredet (Kap.5.1). Disse ble videre koblet til ulike årsflommer, og brukt til å beregne indirekte kostnader (Kap. 5.3). Metoden brukt for å beregne den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten, er utviklet i denne oppgaven. Gjennomgang av litteraturen viser at det er utført få tilsvarende analyser, det mest tilsvarende er metoden har De Jager et al. (2012), som kobler flomvarighet og vegetasjon og benytter gjennomsnittlig antall dager i året vannstanden er over en terskel for å finne hvor lenge et punkt dekkes av flomvann.

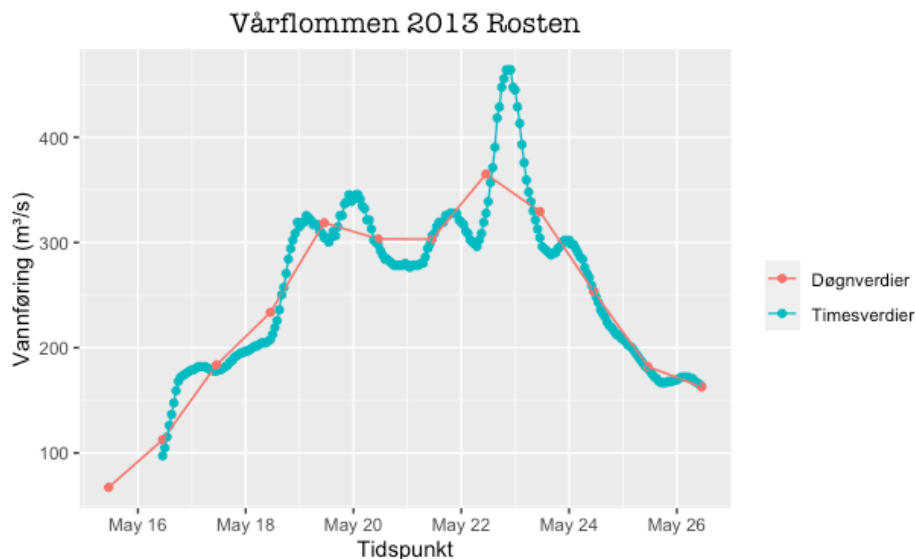
Resultatene viser at de ulike vannføringsseriene viste relativt like varigheter, hvor for eksempel vannføringer tilsvarende en 50-årshendelse hadde en gjennomsnittlig overskridelsesvarighet på rundt 20 timer.

#### 6.1.1 Tidsoppløsning

Varighetsanalysen er avhengig av tidsoppløsningen på dataene. De beregnede årsflommene i Tabell 2 er beregnet på døgnmiddelvannføring, dette gjør at en finere tidsoppløsningen enn ett døgn ikke kan kobles til tabellen. Den finere tidsoppløsningen vil føre til at det registreres for høye vannføringer i forhold til årsflommene i Tabell 2. Dette ser vi blant annet fra Rosten der døgnverdiene registrerer i underkant av en 200 års-flom for høyeste

vannføring (Figur 49), mens med finere oppløsning registreres en returperiode på over 500 år (Figur 50).

De utregnede gjennomsnittlige overskridelsesvarighetene er lave i forhold til den benyttede døgnoopløsningen. Alle de benyttede varighetene i kap. 5.3.2 er på under ett døgn, mens tidsoppløsningen er på ett døgn. Dette vil føre til resultatene er sterkt påvirket av interpolasjonen mellom målingen, og dermed fører til at informasjon om flomtoppens form ikke fanges opp av modellen. Figur 75 viser et eksempel på hvordan en finere tidsoppløsning fanger opp variasjonene i vannføringen som man mister med grovere tidsoppløsning. Kulminasjonen 23. mai i figuren viser at den mer detaljerte tidsoppløsningen registrerer en høyere flomtopp enn døgnerverdiene.



Figur 75: Graf som illustrerer hvordan tidsoppløsningen påvirker modellen.

Den største flommen registrert ved Lalm i gjennomsnittlig overskridelsesdiagrammet, Figur 43, har en timebasert tidsoppløsning. Sammenlignet med Figur 42, som viser tilsvarende diagram basert på døgnerverdier, ser vi at for største flommen blir disse illustrert med en tilnærmet rett strek på begge figurene. Dette indikerer at den informasjonen som går tapt for flomtoppen i Figur 42 som følge av lav tidsoppløsning, ikke er av avgjørende betydning.

### 6.1.2 Tilpasningskurve

Den tilpassede kurven som ble valgt var en logaritmisk kurve. Det finnes lite litteratur å støtte seg til på dette området, dermed måtte valg av kurvetype baseres på resultatene. Det eksisterer kun få tilfeller av de høye returperiodene, dette gir stor usikkerhet til kurvevalget for disse. For de høye vannføringene vil selv små forskjeller i avveiningene for den tilpassede kurven resultere i store forskjeller i beregnet gjennomsnittlig overskridelsesvarighet. Fra figurene som viser antall overskridelser i forhold til terskelvannføring (f.eks. Figur 45), ser en at det er få overskridelser for de høyeste registrerte vannføringene. Som en følge av dette vil de største flommene i vannføringsseriene ha stor påvirkning på de øverste verdiene på varighetsfigurene. Den største flommen registrert i vannføringsserien vil alltid føre til at varigheten i varighetsfigurene går mot null for denne. Dette ble det justert for i tilpassingen av kurven. Det ble også lagt mindre vekt på de målingene med høyest terskelvannføring, ettersom disse har få antall overskridelser. Disse har også en høyere beregnet varighet i forhold til tidsoppløsningen, det er derfor lagt større vekt på de lavere terskelvannføringene ved tilpasningen.

Figur 42, Figur 46, Figur 49 og Figur 53 viser at den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten for de undersøkte vannføringsseriene har en utflatende form for de høyeste vannføringene. Arbeidsserien viste den tydeligste utflatingen, der punktene ved de høyeste terskelvannføringene har en tilnærmet lik overskridelsesvarighet.

### 6.1.3 Regulering

Reguleringer i vassdragene vil også påvirke de beregnede varighetene. Ottavassdraget har vært regulert siden 1941 (Leine, 2015). Det har fire reguleringsmagasin, og disse har mindre innvirkning på flombildet (Drageset, 2000). Reguleringene vil kunne flate ut hydrografen ved de lavere returperiodene. Dette vil påvirke resultatet for varighetene for Lalm ved at det registreres lenger varigheter. Dette fører til stor usikkerhet ved ekstrapolering av varigheter i Figur 46. Dette fordi kurven er basert på regulerte vannføringer, mens de høyeste vannføringene vil i liten grad påvirkes av reguleringene. Det har derfor vært nødvendig å benytte data fra Lalm-tilsig for de høyeste returperiodene i Ottavassdraget, dette er grunnen



til at Lalm-tilsigserien ble benyttet i kap. 5.3.2 for 200-årsflom i Ottavassdraget. Lalm-tilsig gir høyere gjennomsnittlig varighet for lave returperioder enn Lalm, dette er ikke forventet. Dette kan skyldes at Lalm-tilsig er beregnet på vannføringsserie av lenger periode. Feltet til Rosten har vært uregulert (Drageset, 2000), men I 2018 åpnet Rosten kraftverk (Glommens og Laagens Brukereieforening, u.å.). Det er uklart i hvilken grad kraftverket vil påvirke flombildet.

#### 6.1.4 Minimum-tidsintervall og tidspunkt for kulminasjon

Det ble valgt minste tillate tidsintervall mellom to overskridelser spesifikt for hver enkelt vannføringsserie. Otta og Lågen er vårflomdominerte vassdrag (Drageset, 2000). Dette gjør at de registrerte flommene i vannføringsserien ofte består av én distinkt topp. Minimum-tidsintervallet kan derfor settes bredt uten at det fører til at to ulike flommer slås sammen. Minimum-tidsintervallene er satt for lavt når det registreres en økning i antall overskridelser ved økende terskelvannføringen. Dette er kontrollert ved å inspisere dataene i antall-overskridelsesfigurene (f.eks. Figur 44). Det er imidlertid valgt å beholde en økning i antall overskridelser når disse ikke har en påvirkning på resultatene.

For Arbeidsserien som gir vannføringen etter samløpet, vil man forvente to ulike flomtopper, se Figur 2. De største flommene kulminerer mellom 15 og 48 timer senere ved Lalm enn ved Rosten (Leine, 2015). Her er derfor bruk av minimum-tidsintervall nødvendig for å unngå å registrere flere flommer enn det som er tilfelle. En effekt av minimum-tidsintervallet er at små opphold i flommer ikke registreres. Som følge av at flommene får lenger varighet og tilførsel fra flere sideelver nedover i vassdraget, vil behovet for en stor minimums-tidsintervall øke nedover i vassdraget.

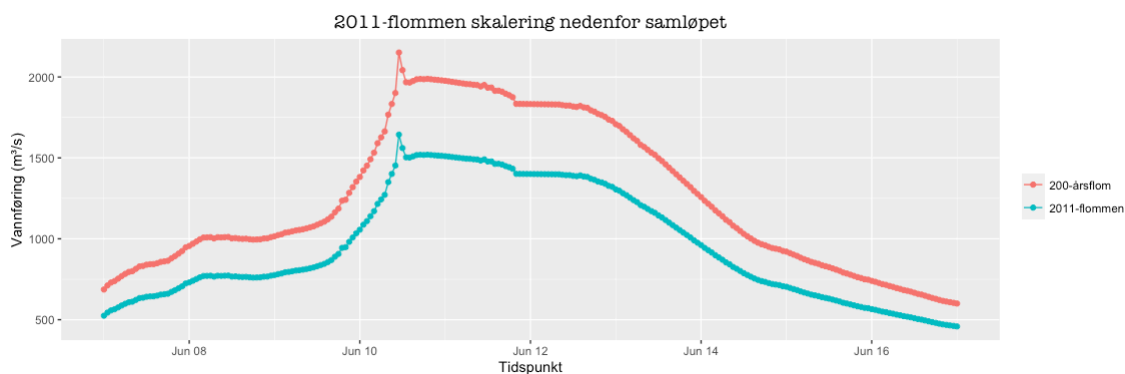
Ved utregning av vannføringene for de ulike returperiodene i Tabell 2, har Leine (2015) benyttet årsflommer og argumenterer for dette med få høstflommer. For Lalm, er derimot den høyeste vannføringen registrert siden 1971 høstflommen 2018. I analysen er det derfor ikke benyttet årsflommer, men alle flommer over en gitt terskel. På denne måten kan flere flommer kan registreres samme år, samtidig som det kan forekomme år uten flommer. Ved analyse av varigheter ved bruk av årsflommer kan det oppstå problemer når flommen

forekommer over et årsskifte (Strupczewski et al., 2013). Studieområdet er derimot ikke preget av flommer i nyttårsskiftet.

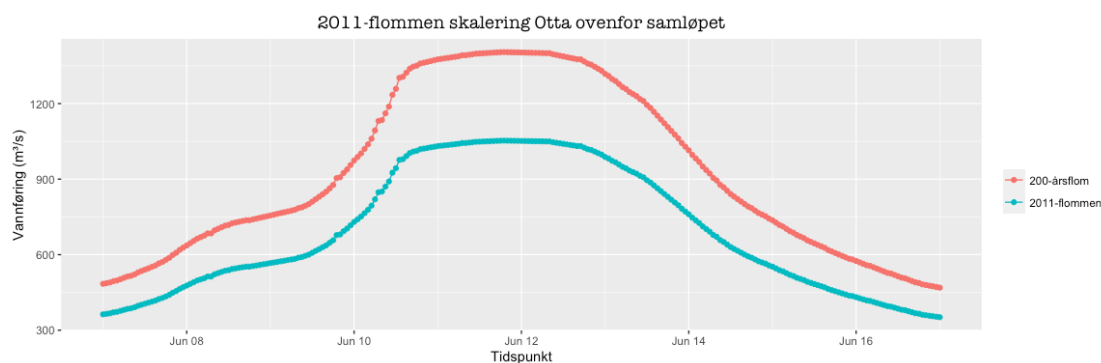
### 6.1.5 Skalering av flommers varighet

Resultatene i denne oppgaven gir ikke informasjon om varigheten til spesifikke årsflommer. I flere tilfeller er det ønskelig å vite varigheten til en gitt årsflom, dette gjelder blant annet ved direkte skader som setningskader, men også indirekte skader når en ønsker å undersøke et gitt scenario. Det er også ønskelig når en ser på flomvoller. Det er vanlig å anta at det ikke er noe flomrisiko når vannet ikke oversvømmer flomvollene, data fra Polen motstrider imidlertid dette (Strupczewski et al., 2013). Kollaps av flomvoller er ofte knyttet til at de blir utsatt for høyt vannivå over tid. Dette fører til at skader på vollene ofte forekommer etter elvens kulminasjon.

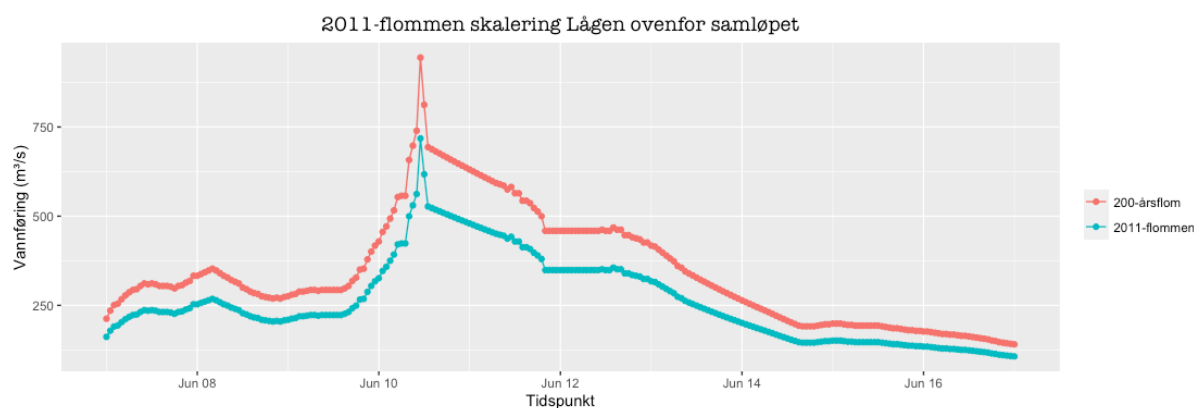
Figur 76 viser skalering av Arbeidsserien fra 2011-flommen. Slike skaleringer kan blant annet brukes til å modellere ikke-stasjonære hendelser i HEC-RAS. Men flommer har individuelle preg, og det er derfor knyttet usikkerhet til skaleringen. Skaleringen er basert på timesverdier og vil derfor undervurdere kulminasjonsvannføringen og dermed vise litt for lang varighet. For en mer korrekt skalering bør det justeres for flomvolum (Glad et al., 2022). Hydrografen vil variere sterkt for Otta siden elven er regulert, formen på hydrografen i Figur 77 vil som følge av dette vise for stor varighet for de høyeste vannføringene. Forskjellen på formen til hydrografen til Rosten(Figur 78) og Lalm(Figur 77) representerer en typisk forskjell mellom regulerte og uregulerte felt.



Figur 76: Skalering av 2011-flommen for Arbeidsserien. 2011-flommen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.



Figur 77: Skalering av 2011-floppen for Lalm. 2011-floppen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.



Figur 78: Skalering av 2011-floppen for Rosten. 2011-floppen er skalert opp slik at kulminasjonsvannføringen tilsvarer en 200-årsflom.

### 6.1.6 Samlet vurdering av varighetsanalysen

I dette arbeidet er det utviklet en metode for å beregne gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for ulike vannføringer. Metoden har vist seg anvendbar ved dens egnethet til å beregne indirekte kostnader som følge av stengt vei og jernbane(kap. 5.3.2).

Den utviklede metoden har flere momenter som fører til usikkerhet i resultatene:

- Metoden er avhengig av høy tidsoppløsning på vannføringsserien. I denne oppgaven har de utregnede gjennomsnittlige overskridelsesvarighetene en varighet som er kortere enn tidsoppløsningen til vannføringsserien(1 døgn), dette fører til usikre resultater.

- Resultatene av metoden er sterkt avhengig av den tilpassede kurven. Formen på kurven er valgt kvalitativt. En mulig forbedring av metoden vil være å undersøke om kurven følger en bestemt funksjon.
- Det er naturlig at det er få antall flommer i en vannføringsserie med svært høye returperioder. Dette fører imidlertid til usikkerhet i justering av den tilpassede kurven.

Selv om resultatene fra varighetsanalysen er til dels usikre, gir de et nyttig anslag, og de er derfor benyttet i analysen av de indirekte konsekvensene av flom (kap. 5.3.2). Her ble den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten av 50-årsvannføring for Arbeidsserien og Lalm og 200-årsvannføringen for Lalm tilsig benyttet. Dette illustrerer at den utviklede metoden er anvendbar for å blant annet å beregne indirekte kostnader knyttet til stengt infrastruktur.

Det har ikke vært mulig å sammenligne de beregnede gjennomsnittlige overskridelsesvarighetene med registrerte varigheter fra tidligere flommer, siden disse ikke er representere gjennomsnittlige overskridelsesvarigheter.

## 6.2 Direkte konsekvenser som følge av flom på infrastrukturen

Resultatene i kap. 5.2 er basert på de modellerte farekartene og konstruerte skadefunksjonene. I dette delkapittelet diskuterer jeg først den benyttete HEC-RAS-modellen. Deretter omtales blant annet funnene fra kap.5.2.3. i diskusjonen av skadefunksjonene. Til slutt i delkapittelet blir de beregnede kartene og kostnadene i 5.2 drøftet. Her viser resultatene blant annet at ved bruk av klimapåslag får Rv15, E6 og Dovrebanen en forventet årlig kostnad på henholdsvis 59 859kr, 604 071kr og 1 087 239kr.

### 6.2.1 HEC-RAS modell

Sammenligning av de modellerte dybdekartene med tidligere dybdekart modellert av Høydal et al. (2000) og Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019) viser ingen store avvik. Høydal et al.

(2000) benyttet en annen type modell, og andre data i modellen. Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019) har laget en modell som på flere områder har benyttet andre data enn det som er gjort i dette arbeidet, blant annet er modellen bygget opp ved hjelp av en 1D-modell. Oppgavens modellen kan derfor brukes som en supplement til de tidligere modellene.

### Stasjonær strømning

Modellen er modellert med stasjonær strømning. Stasjonær strømning er egnet siden ønsket resultat for modellen er vannstanden ved kulminasjon. Bruk av stasjonær strømning kan imidlertid føre at det modelleres for høye vannstander utenfor elvebredden. Er landskapet for eksempel flatt og vannstanden lav, vil det ta tid for vannet å fylle opp terrenget. Et eksempel på dette er Otta togstasjon, en modellering med bruk av stasjonær strømning vil vise at området fylles opp, mens det i realiteten kan det være at vannet ikke rekker å fylle opp togstasjonen før vannstanden igjen synker.

### Grunnvann

Ved flom kan en få en grunnvannsstigning som fører til oversvømmelse i Otta sentrum, selv om elven ikke strømmer inn i sentrum (Colleuille, 2005). Lågen og Otta styrer grunnvannsnivået i Otta sentrum (Colleuille, 2005). Colleuille (2005) skriver at bygging av flomverk ikke vil gi en forbedring av grunnvannsforholdene. I HEC-RAS-modellen laget i denne oppgaven, er det ikke tatt høyde for grunnvannstrømning. Dette kan føre til at det blir simulert for lave vannstander inne i Otta sentrum når elvevannet ikke flommer direkte inn byen, men vannstanden allikevel er høy. I Høydal et al. (2000) er det for eksempel markert områder i nærheten av togs�kinnene i sentrum som ligger under elvehøyden allerede ved 10-årsflom. De konstruerte dybdekartene viser at disse områdene ikke dekkes av vann før mellom en 50- og 100-årsflom.

### Broer

Modellen tar ikke høyde for broene i studieområdet. Dr. Blasy - Dr. Øverland (2020) gir en oversikt over høyden til underkanten til broene i studieområdet. Det er tilsammen fire broer som krysser elven i studieområdet, alle lokalisert ved Otta sentrum. To av disse broene tilhører hovedinfrastrukturen i området. Jernbanen går i bro over Otta og Rv15 over Lågen,

begge broene kan sees i Figur 60. De modellerte vanndybdene viser at vannet vil nå underkanten av begge broene ved en 100-årsflom (uten klimapåslag). Med klimapåslag vil vannet nå underkanten allerede ved en 20-årshendelse for jernbanebroen og en 50-årshendelse for veibroen. Når vannet treffer underkanten kan det oppstå oppstuing. Dette kan føre til at det modellers for lav vannføring i området rundt broene.

### Kalibrering

For kalibrering av modellen mot vannstandsmålinger, var det nødvendig å dele elvestrekningen inn i ulike deler (Figur 30). Inndelingen av disse vil påvirke resultatet ettersom ruhetene innenfor de oppdelte strekningene, varierer. Flommen 2011 er brukt for kalibreringen. Det er valgt å legge hovedvekt på 2011 flommen fordi det kan ha foregått endringer i elvebunnen i perioden etter de tidligere flommene. Samt at det er konstruert flere flomsikringstiltak som kan ha en påvirkning på vannstanden. Vannføringsverdier for kalibreringen er hentet fra Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019), her antas det at elvene kulminerer likt. Vannføringsseriene for Rosten og Lalm viser imidlertid at vannføringen ved Rosten kulminerer 7 timer før vannføringen i Lalm nærmer seg kulminasjon. Syv timer etter kulminasjon hadde vannføringen i Rosten sunket med 30%. Dette kan føre til at vannstandene etter og nær samløpet simuleres for høye. De kalibrerte Manningskoeffisientene blir dermed for lave. Og som et resultat av dette vil den kalibrerte modellen simulere en noe for lav vannstand. Vannstandsmålingene benyttet ved kalibreringen er tatt oppstrøms for samløpet, noe som vil motvirke feilkilden, men en viss påvirkning må beregnes.

#### 6.2.2 Skadefunksjoner

Skadefunksjonene som er benyttet, er basert på litteraturen, se 4.2.5. Disse er generelle, bruk av slike vil medføre viss usikkerhet siden lokale forhold vil ha en stor påvirkning på sårbarheten. Fra Figur 33 ser vi at det er stor forskjell mellom de ulike funksjonene. I litteraturen finnes få skadefunksjoner beregnet spesielt for jernbane, men vei og jernbane blir ofte oppgitt til å ha samme skadefunksjon, noe som blir en grov forenkling. Det finnes få data knyttet til flomskade-analyse på infrastruktur, og modellene som finnes, er lite

etablerte (Merz et al., 2010). Hovedparten av skadedata og skademodeller for flomskade er tilknyttet boliger (Merz et al., 2010).

### Variabler i skadefunksjonene

Hvor stor flomskaden blir, avhenger derimot av flere faktorer, som hastighet og varighet (Merz et al., 2010). Sårbarhetsanalyser er oftest basert på vanddybder eller type/bruk av utsatte elementer, og tar sjelden med variabler som varighet og hastigheter (Merz et al., 2010). På grunn av lite informasjon i litteraturen tilknyttet andre variabler, er vanddybde benyttet som eneste variabel i skadefunksjonene i dette arbeidet. Kreibich et al. (2009) undersøkte forskjellige faktorerens påvirkning på flomskader på veg i Dresden, etter en flom i 2002. Arbeidet inkluderte variablene vanddybde( $m$ ), hastighet( $m/s$ ), strømningskraft ( $dybde * hastighet^2$ ) og intensitet( $dybde * hastighet$ ). Påvirkningen som de ulike variablene hadde på skadene, ble delt inn i fire grader: ingen, liten, medium og stor. Vannhastigheter, strømningskraft og intensitet hadde stor påvirkning på skadene, mens vanddybde hadde middels påvirkning. Fra Hjulstrøms kurve, Figur 1, ser vi at høyere vannhastighet vil gi større erosjonspotensialet. Dette indikerer at denne oppgavens anvendte skadefunksjoner som baser seg på vanddybde, ikke benytter den optimale faktoren for å kartlegge skadegrad. Figur 64 viser at hastighetene utenfor elven er lave i forhold til i selve elven, men at det forekommer hastigheter på over 1 m/s. Merk at man ikke kan anta like nøyaktige resultater for vannhastighet som vanddybde og at HEC-RAS ser bort i fra vertikal variasjon av hastighet noe som øker usikkerheten til verdiene.

Skadefunksjonene i denne oppgaven tar ikke høyde for varighet, Figur 67 viser at jernbanen stenger ved en 50-årsflom. 50-årsflom har kulminasjonsvannføring på 1691 nedenfor samløpet, Figur 76 gir dermed at banen blir oversvømt i ca. tre dager ved en 200-årsflom. Dette indikerer at banen i studieområdet må renses ved en 200-årsflom i studieområdet, som følge av at svillene har vært oversvømt i over et døgn (Wathne et al., 1999).

## Hvordan formen og oppbygningen til infrastrukturen påvirker skade

I dette arbeidet er det undersøkt hvor egnet skadefunksjonene er til å beregne direkte skade på infrastrukturen. Skadefunksjonene benyttet her er basert på senterlinjen til infrastrukturen. Ettersom tverrsnittet av vei og jernbane ikke er flatt, vil skadefunksjonene ikke representere skader som forekommer når det kun er sidene av infrastrukturen som er dekket av vann. Figur 66 viser at det registreres hastigheter innenfor buffersone på 2m flere steder, samtidig registreres det ikke skade her. Det er med andre ord vann innenfor bufferområdet, men det når ikke inn til senterlinjen. Det registreres derfor ingen skade ettersom senterlinjen til skinnene ikke er dekket av vann. Ved bruk av grovere analyser, f.eks. skadeanalyser som fokuserer på hele kontinenter, vil ikke farekartene benyttet greie å skille mellom infrastrukturen og terrenget rundt (Van Ginkel et al., 2021). Skadefunksjonen fra for eksempel Huizinga et al. (2017) i Figur 33 er basert på en grovere skala. Resultatet fra kap.5.2.3 viser at slike skadefunksjoner derfor ikke er optimale for mikroskalaanalyser som dette arbeidet.

Figur 7 viser et tverrsnitt av en standard jernbanefylling. Ved bruk av skadefunksjonene er det ikke registrert skade når vannstand ikke når opp til skinnene. Dette vil derfor føre til en underrapportering av skader for situasjoner der vannstanden ikke når opp til skinnene, men når opp til formasjonsplanet. En slik situasjon med vannstand opp til overbygningen, kan føre til erosjon av pukket(Figur 8) og stenging av banen. På samme måte vil veier vil kunne skades ved vannstander under veidekket. Som en følge av dette, samt resultatene fra kap. 5.2.3, bør det derfor inkluderes en buffersone på infrastrukturen ved skadeberegning, Kellermann et al. (2015) konkluderer tilsvarende.

### 6.2.3 Skadekart, risiko og kostnad

Det er valgt å illustrere skadegrad knyttet til en 200-årsflom(Figur 58 og Figur 59). Dette fordi 200-års-returperiode er et mye brukt intervall for dimensjonering, og kartene vil derfor kunne benyttes som et supplement. 200-års returperioden er brukt ved overvannshåndtering. For vei opereres det med tre sikkerhetsklasser for overvannshåndtering. Sikkerhetsklassene er bestemt av ÅDT og omkjøringsmuligheter, der

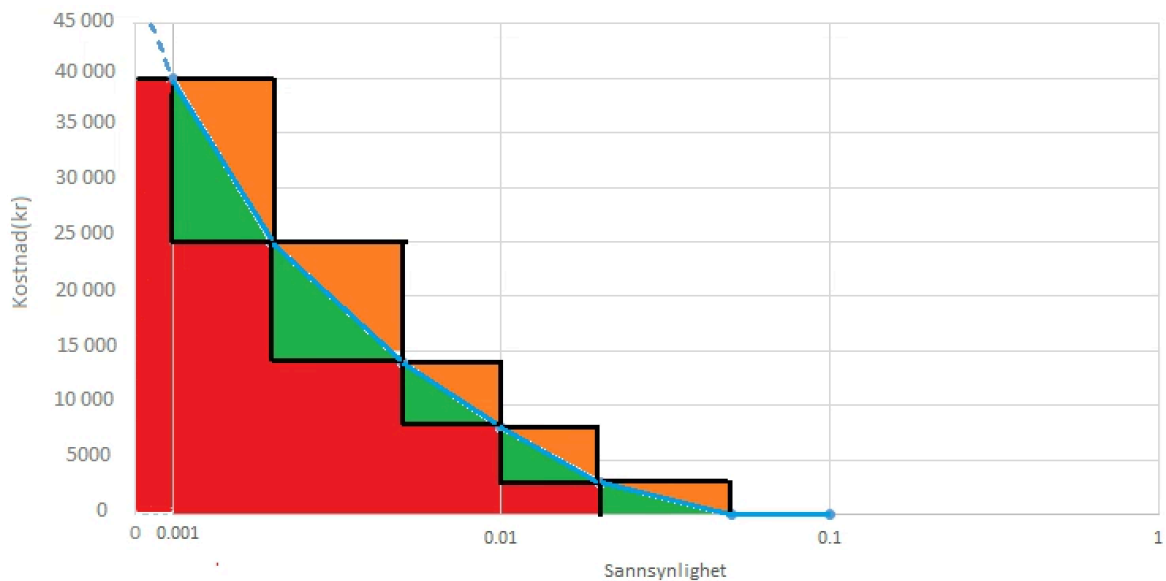


det benyttes en 200 år returperiode for veier med ÅDT over 4000 (Statens Vegvesen, 2018). For jernbanen brukes en 200-årsreturperiode ved dimensjonering av stikkrenner og bruer (Bane NOR, 2021).

Figur 62 viser forventet årlig kostnad beregnet med klimapåslag. Forventet årlig kostnad blir brukt som et mål på risiko i denne oppgaven. Ved bestemmelsene av intervallene i kartet var det nødvendig å gjøre flere avveininger. Ved risikoanalyse ved utbygging av vei er det vanlig å bruke tre klasser, lav, middels og høy (Statens Vegvesen, 2021). Lav indikerer at tiltak ikke er nødvendig, middels at risikoen er høyere enn akseptabel, men ikke uakseptabel, tiltak må vurderes, og høy er uakseptabel risiko. Risikovurderingen i denne oppgaven har som formål å belyse områder der det forventes kostnader knyttet til direkte skade. Intervallinndelingen ble derfor gjort på grunnlag av å illustrere forskjeller i risiko. Figur 62 viser for eksempel at infrastruktursegmentene med høyest risiko finner sted på E6 sør for samløpet. Det er valgt å bruke klimapåslag i risikokartet(Figur 62) slik at det kan brukes til å vurdere tiltak, hvor klimapåslag bør benyttes i henhold til TEK17.

Forventet årlig kostnad og forventet årlig skadegrad ble i dette arbeidet beregnet fra henholdsvis Ligning 7 og Ligning 8. Ligningene kombiner sannsynligheten og kostnaden/skaden knyttet til de modellerte returperiodene. Figur 79 illustrerer hvordan forventet årlig kostnad ble beregnet. Figuren er logaritmisk for å gjøre de forskjellige trinnene samt illustrere de høyeste returperiodene (grafene er lineære mellom 0 og 0,001 på x-aksen). Forventet årlig kostnad er lik arealet til det røde området. Det finnes ikke informasjon tilknyttet kostnad/skadegrad som forekommer mellom de modellerte returperiodene. I oppgaven er det ikke interpolert mellom returperiodene, dette for å unngå overestimering. Dette vil gi en undervurdering av kostnaden. Interpolasjon vil gi en viss overestimering av risiko som følge av risikokurvens konkave form (Ward et al., 2011). Ved interpolering ville det bli registrert ekstra kostnad lik det grønne arealet i Figur 79. Maksimalt kan det forekomme kostnader i tillegg lik det oransje området. Et mulig tilfelle der kostnaden vil være slik som det oransje området er hvis et flomverk oversvømmes rett etter en modellert returperiode. Usikkerheten knyttet til kurven minker når flere returperioder er modellert, Messner (2007) anbefaler minst tre returperioder. I denne oppgaven er det benyttet åtte returperioder som er tilstrekkelig for et realistisk resultat. I Tabell 18 ser vi en markant økning mellom 20-årsflom og 50-årsflom for jernbanen. Store

forskjeller mellom etterfølgende returperioder indikerer en usikkerhet som kan minimeres ved å modellere flere årsflommer.



Figur 79: Figuren viser et eksempel på en risikokurve. Hakkene i figuren illustrerer forskjellige returperioder. For beregning av forventet årlig kostnad er det røde arealet benyttet. Ved å benytte interpolasjon mellom returperiodene vil anslaget øke med verdi tilsvarende det grønne arealet. Maksimalt kan metoden undervurdere anslaget lik summen av det grønne og oransje området.

Det er knyttet stor usikkerhet til meterprisen for vei og jernbane benyttet i denne oppgaven. Gudmund Nilsen i Vegdirektorat sa til Teknisk Ukeblad at kostnadene i Tabell 7 er sterkt avhengig av grunnforhold og om det er eksisterende infrastruktur på området (Solberg, 2014). Arbeid slik som sprenging ved nybygging av vei, er ikke nødvendig ved skader fra flom. En vil heller ikke vente mye grunnarbeid etter en flom. Dette vil dermed føre til stor overvurdering av kostnad. Kapitalslit vil også føre til at det skjer en overvurdering av reparasjonen (Merz et al., 2010), siden infrastrukturen kan være gammel og slitt og har sunket i verdi. En del av skadene på jernbanen som følge av flom, blir reparert på rutinemessige reparasjoner (G. Vatne, personlig kommunikasjon, 15. desember 2022). Dette kan gjøre at det beregnes for høye kostnader. For å få et realistisk bilde av kostnadene må en se på merkostnadene som kommer i tillegg til planlagt vedlikehold.

Estimeringen av kostnader i dette arbeidet kan testes opp mot skadefunksjonen som HYDRA lagde for vei. For en 200-årsflom gir metoden for kostnad brukt i denne oppgaven en kostnad på 10,2 millioner. Ved bruk av skadefunksjonen fra Wathne et al. (1999) gir dette en kostnad på 969 003kr. I Wathne et al. (1999) er det beregnet fra der vannet når opp til

veidekke, mens her er det benyttet der vannet når senterlinjen på veien. Dette vil underestimere kostnaden, men i liten grad. Metoden brukt i denne oppgaven gir en kostnad som er 10 ganger så høy som den brukt i HYDRA. Dette indikerer en overestimering som sannsynlig stammer fra meterpriskostnadene brukt for infrastrukturen.

Sammenligning av Tabell 17 og Figur 62 viser at jernbanen og E6 påvirkes ulikt av flommen. Dovrebanen har høyest forventet årlig kostnad av de to tilnærmet like lange infrastrukturstrækningene. Det er derimot bare E6 som registrerer delstrækninger med forventet årlig kostnad i det høyeste intervallet i Figur 62.

Fra Figur 60 ser vi at det er forventet relativt mye skade i områder der infrastrukturen går ut på jordene. Dette er forventet ettersom områdene representerer en flomslette, der jordbruksjorden er et resultat av gjentatte flommers avsetninger. Tilsvarende kan også forklare den høye skadegraden i Otta sentrum, som ligger på en flomslette.

Figur 60 og Figur 61 viser en stor økning i forventet årlig skadegrad når man benytter klimapåslag i forhold til uten. Klimaendringenes konsekvenser på infrastrukturen blir også bekreftet av Tabell 17. En videre diskusjon av klimaforandringenes effekt er gitt i kap. 6.6.

#### 6.2.4 Samlet vurdering av direkte skade

De detaljerte dybde- og hastighetskartene fra HEC-RAS-modellen gjør det mulig å detaljert analysere direkte skader på infrastrukturen. Skadefunksjonene benyttet i oppgaven, tar ikke hensyn til formen til og oppbygningen av infrastrukturen, undersøkelser i dette arbeidet viste at slike skadefunksjoner ikke er egnet for mikroskalaanalyser. Resultatene fra 5.2. viste at alle de tre infrastrukturstrækningene, Rv15, E6, og Dovrebanen, blir rammet av direkte skader, men i ulik grad. Dovrebanen og E6-sør for samløpet rammes hardest.

Infrastrukturdelstrækningene med høyest risiko finner sted på E6-sør for samløpet. For jernbanen vil det derimot oppstå skader over større strækninger, noe som gjør at Dovrebanen opplever høyest forventet årlig kostnad.

## 6.3 Indirekte konsekvenser knyttet til stenging av infrastrukturen

I resultatkapittelet (kap. 5.3) ble kostnader knyttet til omkjøring beregnet for fjerntogtrafikken og veitrafikken. Resultatene viste at når det ikke tas høyde for klimaendringer, klimapåslag, vil Rv15, E6 sør for samløpet, E6 nord for samløpet og Dovrebanen stenge ved henholdsvis 200-, 50-, 500- og 50-årshendelser (Tabell 19). Kostnadsestimatene viste blant annet at fjerntogtrafikantergruppen påføres en gjennomsnittlig kostnad på tilnærmet 182 000kr hver gang banen stenges ved oversvømmelse (Tabell 21).

I delkapittel 6.3 drøftes de ulike antagelsene som ligger til grunn for kostnadsestimeringen. Dette synliggjør hvordan de ulike faktorene påvirker og fører til indirekte konsekvenser for infrastrukturen i studieområdet.

### 6.3.1 Modellenes generelle antagelser

#### Regionalt mot lokalt studieområde

En grov antagelse gjort i modellene er at det er sett bort fra flom utenfor studieområdet. Realistisk vil man forvente at ved flom i studieområdet vil det også forekomme flom utenfor området. Et eksempel på dette er flommen i 2011, da vei og jernbane ble oversvømt og påvirket også flere steder utenfor studieområdet (Jernbaneverket, u.å.; Svensbakken, 2012). Dette illustrerer kompleksiteten når man søker å vurdere indirekte kostnader som følge av flom. For å ta høyde for dette, er det nødvendig med flomkart over større områder. Aktsomhetskartene dekker et større området, men detaljtettheten til disse kartene er for lave til at de er egnet. Ved undersøkelser over større områder er det i tillegg nødvendig å benytte transportanalyseverktøy, ettersom kompleksiteten vil være svært stor. Samtidig vil det være stor usikkerhet knyttet til flomvariasjon i de forskjellige vassdragene. For å bøte på denne variasjonen, kan man analysere flomhendelser i etterkant.

## Sideelver og ras

Det er ikke inkludert eventuell innvirkning fra sideelver i dette arbeidet, men som ved direkte skader vil sideelver være en faktor som kan føre til store indirekte kostnader. Sideelver utgjør en stor potensiell fare i de tilfeller der de krysser/ trenger inn i infrastrukturen. Det kreves bare ett punkt/ område for å stenge ned en infrastrukturstrækning. Man kan forvente at det vil være en korrelasjon mellom når sideelvene flommer og når hovedelven flommer. Flommen i 2011 førte til skader på infrastrukturen i både hoved - og sidevassdrag (Jernbaneverket, u.å.; Svensbakken, 2012). Skred forekommer også ved flomhendelser som i 2011 da skred stengte Fv2600 mellom Sjøa og Otta (Svensbakken, 2012). 2011 var en snøsmelteflom, og representerer derfor en typisk flom i studieområdet (Kleivane, 2011). Dette vil gjøre at kostnadene tilknyttet stenging av infrastruktur blir lavere enn beregnet i kap. 5.3.2. Er veien for eksempel allerede stengt av et skred når flommen forekommer, vil ikke kostnadene kunne kobles direkte til flom i hovedvassdraget.

## Ulike kulminasjonstidspunkter for Lågen og Otta

Det er i modellen ikke tatt hensyn til at Lågen og Otta kulminerer på ulike tidspunkter. En slik tidsmessig ulik kulminasjon kan medføre at stengetiden øker, for eksempel hvis jernbanen først stenges av en flom i Lågen og deretter av flom i Otta. Det kan også føre til at omkjøringsrutene blir kortere siden ikke alle veiene vil være stengt samtidig. I beregningene de endelige farekartene, er farekartene for Lågen og Otta slått sammen, og den høyeste vanddybden for hvert punkt er benyttet. Tabell 15 og Tabell 16 viser for eksempel at vannføringen nedenfor samløpet ved en 50-årshendelse er tilnærmet lik når både Otta og Lågen er flomførende elv. I oppgaven er dette farekartet satt til å ha et gjentaksintervall på 50 år. Antar en at Otta og Lågen ikke er flomførende samtidig, vil det derimot føre til at dette farekartet har et gjentaksintervall på 25 år. I oppgaven er det derimot antatt at vannføringene i elvene har en relativt stor korrelasjon, dette støttes av at vannføringene i Tabell 15 og Tabell 16 ved at den ikke flomførende elven også har relativt stor vannføring.

## Reparasjonstid

I modellene er det ikke medregnet nedetid knyttet til reparasjon av vei og jernbane etter flom. Reparasjonsperiodene kan være av lengre varighet, Dovrebanen ble for eksempel stengt i tre uker som følge av et ras i Sokndal i 2012 (NTB, 2012). Til sammenligning vil en stenging på tilsvarende lengde av Dovrebanen i studieområdet medføre en kostnad på 4,6 mill. kr (Tabell 22). Varighetene som er benyttet i dette arbeidet er betraktelig lavere siden reparasjonstid ikke er inkludert, for eksempel er gjennomsnittlig stengt tid for Dovrebanen 19,9t. Riksveiene er ofte bedre sikret mot erosjon og setning enn fylkesveiene (Wathne et al., 1999). Dette kan føre til at alternativveiene påføres større skade og derfor må være stengt i lengre tid enn hovedveiene. Hovedveiene i området ligger imidlertid nærmere elven, det er rimelig å forvente at disse da påføres større skader som følge av større vannhastigheter.

En forbedring av modellen vil være å inkludere reparasjonstid. Reparasjonstid er avhengig av de direkte skadene, og en forbedring vil derfor være å inkludere skadekartene (Figur 60 og Figur 61) i beregning av nedetid. Dette vil imidlertid være utfordrende. Modellen for å beregne indirekte kostnader er basert på å lokalisere det svakeste punktet på infrastrukturen. Det er derimot ikke nødvendigvis dette punktet som fører til lengst nedetid. Ved å sammenligne Figur 57 med lokasjon 3. i Figur 60, som er det svakeste punktet på jernbanen, ser vi at dette punktet ikke har høyest forventet årlig skadegrad.

### 6.3.2 Analyse av modellen benyttet for å beregne kostnader for vei

Tabell 21 viser at når E6 får en vannføring som er større enn ved en 50-års flom, blir veien stengt. En slik stengning koster E6-trafikanterne gjennomsnittlig 1 735 819kr hver gang dette inntreffer. Tilsvarende kostnad på Rv15 er 225 285 kr. Denne veien stenges først ved en vannføring tilsvarende en 200-årsflom.

Det er store forskjeller på stengekostnadene for disse to veiene, dette skyldes i hovedsak at E6 er mye mer trafikkert, med flere trafikanter som dermed rammes av flommen. I tillegg stenges E6 ved en 50-årsflom, mens Rv15 stenges først av en vannføring tilsvarende en 200-årsflom. Den gjennomsnittlige varigheten på stengingen er dermed lenger for E6 enn Rv15, siden overskridelsesvarigheten synker for høyere returperioder. Samtidig er gjennomsnittlig

overskridelsesvarighet for de ulike returperiodene lenger nedenfor samløpet(E6) enn i Otta(Rv15) (Tabell 14 og Tabell 16).

Infrastrukturen i studieområdet er sårbar for flom. Det dalpregede terrenget gir lange og til dels uegnede omkjøringsruter. Dette vil føre til en relativt stor kostnad ved stenging av vei. Tabell 19 viser hvordan infrastrukturen i området stenger ved flom. Veiene i studieområdet følger i hovedsak dalbunnen. Fra tabellen ser vi at alle alternative veier stenger før hovedveiene. Wathne et al. (1999) skriver at fylkesveiene ofte legges høyere i terrenget og har dermed en mindre flomfare enn riksveier. Dette stemmer ikke med veiene i studieområdet(Tabell 19), og man kan regne med at den store hellingen i dalføret har ført til at fylkesveiene har måtte bli lagt lenger ned. I modellen er det antatt at veien er stengt når vannet dekker senterlinjen til veien på ett punkt. Figur 69 viser at E6-sør er delvis dekket ved en 50-årsflom, i modellen betyr dette avstengt vei. Siden dette er veier med høy fartsgrense og stor biltetthet, kan man anta at veien blir stengt allerede når vannet når opp til veidekket. Veien kan også bli stengt hvis det oppstår erosjon som kan utgjøre fare for kjøretøyene, slik erosjon kan også utvikles ved lavere vannhøyder.

### Tidsverdier og kjøretøykostnader

Modellen for vei ser på kostnader knyttet til tidsverdier og kjøretøykostnader. Disse faktorene er valgt siden generelle data for trafikanter gjør det mulig å kvantifisere dem. Tidskostnadene for trafikantene er avhengig av formålet til trafikanten. I Otta som er et viktig knutepunkt mellom de ulike landsdelene, kan man forvente at det er mange langtidsreisene som passerer studieområdet. Det er derfor benyttet tidsverdier knyttet til veireiser på mellom 70 og 200km. Fra Tabell 9 ser vi at tjenestereisene har fire ganger så høy tidsverdi som fritidsreisende. Flommer i studieområdet forekommer oftest om sommeren, og man kan derfor forvente flere fritidsreisende enn ellers i året. Dette kan føre til at det blir benyttet for høy andel tjenestereisene, og dermed en overestimering av tidskostnadene.

### Antall reisende og deres reiseruter

I modellen er ÅDT(årsdøgntrafikk) brukt for å beregne kostnader. Dette medfører flere usikkerheter i og med at ÅDT ikke oppgir hvor kjøretøyene skal eller kommer fra. En stor del av trafikken kan være lokal, og det er å forvente at lokal trafikk vil ha større fleksibilitet og dermed i mindre grad bli påvirket av en flom. (Hallenbeck et al., 2014) viser at det vil være mindre kostnader knyttet til lokaltrafikk ved en flomhendelse. E6 er en hovedvei som forbinder Trondheim og Oslo, og man kan derfor forvente at en stor del av trafikken i området er knyttet til denne distansen. Imidlertid oppgis ÅDT over Dovrefjell til en verdi av 2268, mens E6 sør for Otta har en ÅDT på 6159. Dette indikerer at trafikken i studieområdet i større grad er lokalt. Det begrensede informasjonen i ÅDT gjør det vanskelig å anta start og slutt punkt for trafikantene. Ved reiser over lengre avstander vil trafikantene ha større muligheter til å benytte mer effektive omkjøringer.

### Forhold på omkjøringsveien

Kostnadene knyttet til tidsverdier vil påvirkes av standarden på omkjøringsveien. En kan forvente at omkjøringsveiene ikke er dimensjonert for den økte trafikken. Dette kan føre til slitasjeskader på omkjøringsveiene. Man kan også forvente at det vil oppstå kø på omkjøringsveiene ettersom veiene ikke er dimensjonert for den ekstra trafikken. Tiden for reisen vil derfor øke, noe som igjen gir økte tidskostnader. Det er også nødvendig å vurdere om veiene kan holde tungtrafikk. Figur 80 viser at den alternative veien til E6-sør er så smal at det vil gi problemer for møtende tungtrafikk. Ifølge Tabell 19 er ikke de alternative veiene aktuelle for omkjøring. I et tilfelle der kun disse veiene er åpne, kan de største kjøretøyene måtte bli nødt til å kjøre en lenger omkjøringsrute enn de mindre.





Figur 80: Fv2600s veibane. Alternativ vei mellom Sjoa og Otta. Foto Ole Fjellstad Holt

### 6.3.3 Analyse av modellen benyttet for å beregne kostnader for jernbanen

Jernbanen i studieområdet er spesielt sårbar, ettersom det ikke finnes andre alternativer i nærheten enn buss for tog.

Tabell 19 viser at jernbanen stenger ved en 50-årsflom. Figur 66 har inkludert en buffersone, viser imidlertid at det kan oppstå skade på banen allerede før vannet når opp til skinnene. Erosjon, som på Figur 8, vil sannsynlig stenge banen lenge før vannet når opp til skinnene. Man kan derfor forvente at jernbanen stenger før vannet når opp til banen, altså et kortere gjentaksintervall enn 50 år, som er benyttet i modellen.

#### Fjerntog

I modellen er det sett på kostnader knyttet til fjerntog. For hver gang banen dekkes er kostnaden i snitt 197 842kr, hvor dekking skjer i snitt hvert femtiende år. Dette gir forventet årlig kostnad på 3 957kr.

Det er valgt å fokusere på fjerntog grunnet stor usikkerhet i antall passasjerer for de andre togtypene. Fjerntog kan antas å utgjøre en stor del av passasjertallet. Tabell 12 viser at

flertallet av passasjertogene tilhører fjerntog. Samtidig som regiontog har svært ugunstige avgangstider. Passasjerantallet knyttet til fjerntog ble regnet ut ved å kombinere flere kilder, noe som gjør antallet usikkert. Det er vanskelig å verifisere dette antallet, men i 2009 måtte 350 passasjerer vente i Otta som følge av teknisk feil (Andersen, 2009). Til sammenligning er 180 passasjerer per fjerntog benyttet i oppgaven.

I modellen er det sett bort fra godstogene, fordi det var vanskelig å finne verdier og kvantifisere kostnadene for godstogene. Det vil imidlertid være store kostnader knyttet til godstog som følge av stengt bane. Godstogene på Dovrebanen har 50% markedsandel mellom Oslo og Trondheim (Banenor, u.å.). Tidligere konsulent i PwC Fredrik Dingsør-Dehlin (Personlig kommunikasjon, 14. mars 2022) sier at gods trolig effektivt vil bli flyttet over til lastebiler, noe som vil begrense kostnadene.

I modellen er det ikke medregnet tid på bytte mellom buss for tog. Dette vil medføre en ekstra tidsverdi som vil gjøre kostnaden større.

### Varighet

En kan forvente at varigheten til flomhendelsene øker nedover i vassdraget. Dette kan sees ved å sammenligne gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for Arbeidsserien (Tabell 16) som representerer forholdene nedenfor samløpet, med gjennomsnittlig overskridelsesvarighet for Lalm (Tabell 13) og Rosten (Tabell 16), men forskjellene her er små og ikke nødvendigvis signifikante. Dette indikerer at hvis det er returperioden som er avgjørende for hvor jernbanetraseen plasseres, vil dette føre til at stengetiden øker nedover i vassdraget. For jernbanen vil dette spille en stor rolle, ettersom en flom langt nede i vassdraget vil stenge banen i studieområdet.

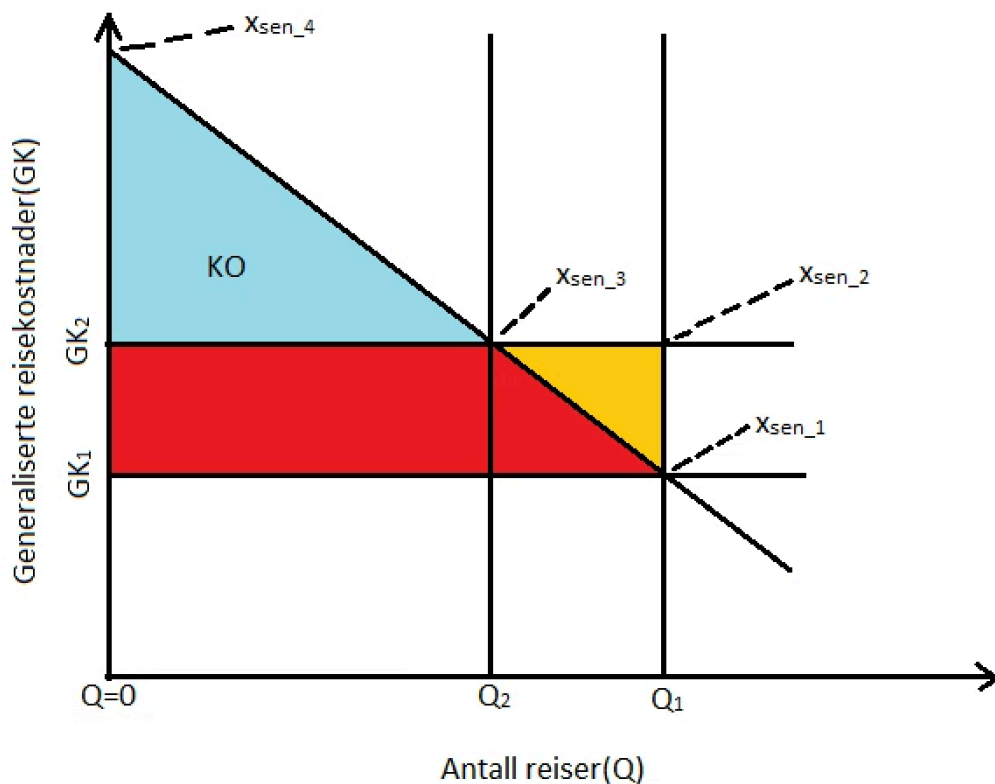
#### 6.3.4 Kostnader tilknyttet ulike handlingsmønstre hos trafikantene.

U.S. Army Corps of Engineers (2013) skriver at kostnadene ved stengt infrastruktur er tilsvarende kostnaden av at alle tar omkjøringsvei eller benytter andre transportmidler. En slik forutsetning er benyttet i denne oppgaven. Hallenbeck et al. (2014) argumenterer at dette vil gi et høyt kostnadsestimat. De reisende kan velge et annet handlingsmønster enn

omkjøring ved en flomhendelse. Alternativ handling kan for være å ikke reise, eller å vente til infrastrukturen åpner igjen. Dette er scenarier som er relevante for å forstå kostnadsestimatet i oppgaven. For å få oversikt over hvordan de reisende vurderer situasjonen og hvordan de tar ulike valg kan man benytte seg av intervju, slik som Bardal (2018). Dette vil minske usikkerheten knyttet til det antatte handlingsmønsteret til trafikantene og dermed gi et mer korrekt kostnadsestimat.

Ved hendelser der infrastrukturen stenger i et forventet kort tidsrom, vil en del av trafikantene vente til at hendelsen er over. Dette er vanligere for små skred over veien. Disse hendelsene er ofte dårlig varslet og opprydning tar relativt kort tid. I slike scenarier der trafikantene venter, kan en regne ut tidskostnad ved å ta halve stengetiden for hendelsen og koble det til tidsverdiene i Tabell 9. Årsaken til å bare benytte halve stengetiden, er at trafikantene vil komme til hendelsen på forskjellige tidspunkter. Dette gjør at gjennomsnittlig ventetid dermed tilsvarer halve stengetiden. Flom er ofte godt varslet, noe som gjør slike scenarier mindre relevante for flomhendelser (F. Dingsør-Dehlin, personlig kommunikasjon, 14. mars 2022).

Kostnadsberegningene kan forklares oversiktlig ved hjelp av et markedskryss (Figur 81). KO, konsumentoverskuddet, representerer nytteoverskuddet trafikantene får ved å reise. Generaliserte reisekostnader (GK) i Figur 81 er kostnadene til trafikantene, som blant annet innebærer tidsverdier (Siedler, 2015). Før et flomsenario, vil likevekten ligge i krysset mellom  $GK_0$  og  $Q_0$ ,  $x_{sen\_1}$ . Da vil nytteoverskuddet til trafikantene være lik summen av det blå og det røde området. Ved en gitt flomhendelse vil omkjøring føre til at GK øker fra  $GK_1$  til  $GK_2$ . I modellen brukt i denne oppgaven er kostnadene beregnet ut fra punktet  $x_{sen\_2}$ , summen av det røde og gule området. Det er ikke beregnet noe reduksjon i antall reisende, og antall reisende er ikke forandret, og lik  $Q_1$ . Dette vil føre til at for noen av trafikantene vil nytten av reisen være mindre enn kostnaden av reisen. Dette kan resultere i at de reisende velger å ikke reise. Dette vil gjøre at kostnadene knyttet til en flomhendelse blir mindre, og kostnaden reduseres til bare det røde området. Et slikt scenario er beskrevet i  $x_{sen\_3}$ . I tilfeller der alle veier er stengte, og ingen reiser kan forekomme, vil hele konsumentoverskuddet bli borte, og kostnaden blir da lik det røde og det blå området i Figur 81, scenarioet er beskrevet i  $x_{sen\_4}$ .



Figur 81: Indirekte kostnader ved forskjellige senarioer knyttet til handlemønsteret til trafikantene. Figuren er basert på figurer i Siedler (2015).

I denne oppgaven er det sett bort i fra at E6 nord for samløpet stenger ved en 500-årsflom. I et slikt tilfelle vil alle veier være stengt inn til Otta, og en relativt stor del av de reisende i studieområdet får derfor ikke reist. Slike tilfeller medføre større kostnader enn når det er mulig å benytte en omkjøring, og hele konsumentoverskuddet blir borte. Konsekvensene knyttet til en 500-årshendelse i studieområdet er derfor store. Kostnadene ved stenging av alle veier vil for eksempel kunne være svært store for helsevesenet og brukerne, hvor tidsverdien til skadede kan være svært høy.

Er en flomhendelse godt varslet, kan trafikantene ta avgjørelser for å minimere tapet. Godt utviklede veibeskrivelser på nettet gjør at bilistene vil ta effektive omkjøringer som senker kostnadene. Forståelse av omkjøringsrutene vil gjøre at reisende kan vurdere kostnaden som for stor og heller velge å avbryte reisen.

### 6.3.5 Forventet årlig kostnad

I oppgaven ble det utregnet forventet årlig kostnad tilknyttet de indirekte kostnadene. Dette er mulig ettersom de ulike omkjøringene for E6 og for Rv15 ikke overlapper, hadde de gjort dette ville forventet årlig kostnad måtte regnes ut på en annen måte. Forventet årlig kostnad for de indirekte konsekvensene for E6, Rv15 og Dovrebanen er henholdsvis 34 716kr, 1126kr og 3645kr. E6 skiller seg ut og er den infrastrukturstrækningen som rammes hardest i studieområdet.

At det er mulig å kunne beregne den forventede årlige kostnaden med metoden illustrerer styrken ved å benytte gjennomsnittlig overskridelsesvarighet. Dette gir et totalbilde av kostnaden som man ikke oppnår ved å bare undersøke spesifikke flomhendelser, slik som Hallenbeck et al. (2014). Når man kun ser på spesifikke flomhendelser, vil man bare få informasjon knyttet til denne hendelsen. Metoden benyttet i dette arbeidet, kombinerer derimot flere hendelser.

Grunnet at beregningene for de indirekte kostnadene er basert på gjennomsnittlig overskridelsesvarighet, samtidig som at de omhandler et mindre lokalt område, finnes det ikke data å sammenligne resultatene med.

### 6.3.6 Andre indirekte kostnader

Kostnadene som er analysert over, har fokus på tidsverdier, men indirekte konsekvenser favner mye videre enn tidstap og kjøretøykostnader. Et eksempel er de store ringvirkningene som industrien kan erfare som følge stengt infrastruktur og dermed logistiske problemer. De indirekte kostnadene kan være svært kompliserte og ha effekter som varer i mange år (Merz et al., 2010).

### 6.3.7 Samlet vurdering av indirekte konsekvenser

Kostnadsestimatet for de indirekte konsekvensene baserer seg på tidstap og kjøretøykostnader. Dette er den delen av kostnadsbildet som lettest lar seg kvantifiseres, men det representerer ikke det totale kostnadsbildet. Resultatene gir allikevel en indikasjon

på størrelsesordenen av de indirekte kostnadene.

Kostnadsestimatet er sterkt avhengig av varigheten på stengt infrastruktur, blant annet vil den utelatte nedetiden knyttet til reparasjon, føre til at kostnadene settes for lavt.

I dette arbeidet er det utviklet en metode der midlere overskridelsesvarighet av en bestemt vannføring kobles til farekart. Dette gjør det mulig å finne gjennomsnittlig stengetid av infrastrukturen. Metoden har vist seg anvendbar for å beregne kostnader tilknyttet indirekte konsekvenser ved flom. Den gir et totalbilde av kostnadene som en ikke får ved å undersøke spesifikke hendelser.

#### 6.4 Forholdet mellom indirekte og direkte konsekvenser

Environment Agency (2018) analyserte kostnader knyttet flom i England i desember 2015. Her har de antatt etter vurdering at 50% av et kostnadsestimat på veier er knyttet til skader og 50% knyttet til forsinkelser og stengning. Her har de antatt et rundt tall, men gir en indikasjon på hvilket forhold en kan forvente mellom direkte og indirekte skader. I denne oppgaven, estimeres imidlertid de direkte kostandene til å være mye høyere enn de indirekte. Den direkte kostnadsanalysen bærer preg av overestimering som følge av høye enhetspriser på infrastrukturen. Samtidig farges den indirekte analysen av en underestimering siden det ikke er tatt hensyn til nedetid som følge av reparasjon.

De indirekte konsekvensene er sterkt avhengig av de direkte konsekvensene. Ved store ødeleggelse på infrastrukturen vil det oppstå store indirekte konsekvenser som følge av lang reparasjonstid og tilhørende lang nedetid.

## 6.5 Sikringstiltak

Resultatene i denne oppgaven kan brukes til å vurdere og prioritere sikringstiltak. De utregnede kostnadene kan sees på i et kost-nytte perspektiv for å vurdere sikringstiltak, slik som Ventimiglia et al. (2020). Kunnskap om skade på vei kan brukes som et supplement ved vurdering av sikringstiltak som rettet mot elementer som bygninger. I studieområdet er det vurdert sikringstiltak som masseuttak og flomverk (Dr. Blasy - Dr. Øverland, 2019; Oppland Fylkeskommune, u.å.). I Figur 82 vises en av flere flomvoller i nærheten av Otta sentrum.

Figur 62 viser at det forventes kostnader knyttet til direkte skade på jernbanen ved sentrum av Otta. Dette er et område som har flere sikringstiltak og som det regelmessig blir vurdert sikringstiltak for. Resultatene i denne oppgaven vil kunne brukes i en kost-nytte vurdering av sikringstiltak for dette området.

I kap. 5.3.1 er ulike svake punkt på infrastrukturen analysert. Disse svake punktene er de første punktene på infrastrukturen som blir oversvømt. Dette er punkter som det derfor kan være hensiktsmessig å vurdere sikringstiltak for. Ved å lage sikringstiltak ved disse punktene, vil man kunne redusere de indirekte kostnadene. Kostnadsreduksjonen er avhengig av blant annet hvor mye ekstra vannføring som skal til for å stenge et nytt punkt. Modelleringen har vist at det første punktet på jernbanen som blir oversvømt, er ved lokasjon 3 i Figur 57. Dette er et området som Dr. Blasy - Dr. Øverland (2019) har modellert sikringstiltak for. Resultatene i denne oppgaven kan derfor bidra til vurdering av lønnsomheten til sikringstiltak ved denne lokasjonen.



Figur 82: Flomvoll langs Otta. Foto Ole Fjellstad Holt.

## 6.6 Klima

Sammenligning av Figur 58 og Figur 59 viser at flomfaren og direkte skader vil øke med fremtidens klima. Med klimapåslag på 20% vil 200-årsflommen med klimapåslag tilsvare en 1000-årsflom uten klimapåslag. Totalkostnaden for jernbanen i studieområdet ved 200-årsflommen øker med 269% når det er benyttet klimapåslag. Andel jernbane der senterlinjen er dekket, øker med 25,9%, fra 4340m til 5465m. Totalkostnaden for E6 øker med 459%, og for Rv15 er det en økning på 16 649%. Den store økning for Rv15 skyldes at riksveien så vidt er dekket ved en 200-årsflom uten klimapåslag, se Figur 71. Total andel vanddekt vei i studieområdet øker med 278%, fra 1520m til 4225m.

Figur 60 og Figur 61 viser en tydelig økning i forventet årlig skadegrad som følge av bruk av klimapåslag. Dette gir en økning i forventet årlig kostnad på 635% for E6, 899% for Rv15 og 507% for jernbanen. Denne kostnadsøkningen vil gjøre at flere og mer kostnadstunge sikringstiltak vil være samfunnsøkonomisk lønnsomme.



De indirekte konsekvensene vil også bli påvirket av klimaforandringene. Tabell 19 viser at alle infrastrukturstrøkningene registrerer en stenging ved en lavere returperiode når det er benyttet klimapåslag, E6 går fra å først bli registrert dekket ved en 50-årsflom til å bli dekket ved en 20-årsflom, Rv15 fra 200-årsflom til 100-årsflom og Dovrebanen fra 50-årsflom til 10-årsflom.

For det tidligere fylket Oppland forventer man en økning i ekstremnedbør og regnflommer (Norsk Klimaservicesenter, 2021). Det vil også forekomme en økt jord-, flom- og sørpeskred fare på grunn av økt ekstremnedbør (Norsk Klimaservicesenter, 2021). Dette vil føre til større risiko på infrastrukturen i studieområdet som følge av naturfarer.

Det forventes også at snøsmelteflommene vil komme tidligere på året, samtidig som de blir mindre mot slutten av århundret (Norsk Klimaservicesenter, 2021). En kan derfor forvente at flommene i studieområdet vil komme tidligere på året. Flomtidspunkt kan ha en påvirkning på kostnadsbildet. For eksempel kan flommer i juli resultere i mindre skade etter som det økonomiske aktiviteten er lavere i sommerferien. Matti et al. (2017) har undersøkt sesongskifte i vannføring og har også funnet at snøsmelteflommene vil komme tidligere på året (Matti et al., 2017).

## 6.7 Oppsummering av usikkerheter

En stor del av diskusjonskapittelet i denne oppgaven har vært å analysere usikkerhetene i oppgaven. Dette er gjort for å forstå metodene og resultatenes anvendbarhet. Ved å analysere usikkerhetsmomentene får en også en god oversikt over de ulike faktorene som spiller inn. Usikkerhetsmomentene viser også mulige forbedringspotensial. De viktigste usikkerhetsmomentene i oppgaven er listet i Tabell 23.

Tabell 23: Oppsummering av de viktigste usikkerhetsmomentene i oppgaven.

Varighet	Tidsoppløsning til vannføringsseriene: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Det er benyttet døgnverdier som har en lav tidsoppløsning i forhold til de resulterende varighetene.</li> </ul>
	Reguleringseffekten er i liten grad tatt høyde for i analysen.
	Tilpassing av kurve: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valg av type kurve er basert på resultatene</li> <li>- Få tilfeller av de høyeste vannføringene.</li> </ul>
Direkte skade	Skadefunksjoner: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Det er benyttet generelle skadefunksjoner som ikke er tilpasset studieområdet.</li> <li>- Skadefunksjonene benytter vanndybde som eneste faktor.</li> <li>- Skadefunksjonene tar ikke høyde for skader som oppstår når vannet ikke dekker senterlinjen til infrastrukturen.</li> </ul>
	Det er usikkerheter tilknyttet de hentede flomvannføringene.
	Kalibreringsverdier
	Løpemetervisning på infrastruktur
Indirekte skade	Usikkerhetene over knyttet til de modellerte farekartene og utregnede gjennomsnittlige overskridelsesvarighetene
	Antall reisende på strekningen og deres reiserute
	Tidsverdier og kjøretøykostnader
	Stenging forekommer først når vannet dekker senterlinjen til infrastrukturen.
	Reparasjonstid er ikke inkludert
	Det er antatt at veiene utenfor studieområdet er åpne
	Handlingsmønsteret til trafikantene ved en flomhendelse
	Stenging knyttet til sideelver og ras
	Sammenslåing av farekartene til Lågen og Otta

## 7 Konklusjon

Formålet med denne oppgaven har vært å få økt kunnskap om konsekvenser som flom kan ha på vei og jernbane. Konsekvensene har blitt kartlagt og analysert. Det har det vært nødvendig å utvikle en ny metode for utregning av indirekte kostnader. Resultatene fra dette arbeidet vil kunne bidra til å begrense skadeomfanget av flommer, som ved å optimere sikringstiltak. Fremtidens klima vil føre til større og hyppigere flommer, oppgaven gir kunnskap som kan gjøre infrastruktur mer rustet til å møte fremtidens klimautfordringer.

- Den konstruerte modellen for å beregne gjennomsnittlig overskridelsesvarighet har vist seg anvendbar og kan brukes til å beregne indirekte kostnader for stengt infrastruktur. Modellen er avhengig av blant annet høy tidsoppløsning på vannføringsseriene og lange vannføringsserier. Resultatene viser at den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten har en utflatende form for de høyeste vannføringene.
- Oppgaven har vist at studieområdet er utsatt for direkte skader. Dovrebanen, E6 og Rv15 har en forventet årlig kostnad tilknyttet direkte skader på henholdsvis 1 087 239kr, 604 071kr og 59 859kr, når det er benyttet klimapåslag. Dovrebanen opplever de høyeste kostnadene i studieområdet, mens delstrekningene med høyest risiko finner sted på E6 sør for samløpet.
- Dette arbeidet har vist at skadefunksjonene som er benyttet, er lite egnet for analyser ved høy detaljetthet, funksjonene fanger ikke opp formen til og oppbygningen av infrastrukturen. Funksjonene kan forbedres ved å ta høyde for dette, samt inkludere flere variabler som varighet og hastighet.
- En sammenligning av de benyttede skadefunksjonene for vei med tilsvarende utviklet i prosjektet HYDRA, indikerer at de direkte kostnadsberegningene gjort i dette studiearbeidet, gir for høye resultater. En mulig forklaring er den benyttede meterpris på infrastrukturen.

- De modellerte farekartene viser god overenstemmelse med tidligere modellerte farekart i studieområdet. Denne oppgavens farekart er imidlertid mer detaljerte og favner et større området, noe som fører til en bedre oversikt over konsekvensene. Farekartene viste seg egnet til å undersøke direkte og indirekte konsekvenser på infrastrukturen.
- Infrastrukturen i studieområdet er sårbar for indirekte skader som følge av flom. E6 stenges ved vannføringer større enn en 50-årsflom. Det er mange som benytter E6, og med de lange omkjøringsrutene som finnes i studieområdets dalpregede terreng, vil en stengning av denne veien i gjennomsnitt koste trafikantgruppen 1 735 819kr i tids- og kjøretøykostnader. Tilsvarende kostnad for Rv15 er 225 285 kr. Riksveien stenges først ved vannføringer tilsvarende en 200-årsflom. For banen er tidstapskostnaden til fjerntogtrafikantene i gjennomsnitt 197842kr hver gang banen stenges, noe som skjer ved overskridelse av en 50-årsflom.
- Den konstruerte metoden for beregning av indirekte kostnader ved bruk av gjennomsnittlig overskridelsesvarighet, har vist seg egnet. Metoden gir et totalbilde av kostnaden som en ikke får ved å kun undersøke spesifikke flomhendelser. Metoden kan brukes for andre vassdrag for å finne indirekte kostnader ved flom. Metoden fanger imidlertid ikke opp nedetid knyttet til reparasjoner. For studieområdet vil denne nedetiden utgjøre en betydelig del av kostnadsbildet og dermed gi en underestimert av de indirekte kostnadene.
- Infrastrukturen vil rammes hardt av fremtidige klimaendringer. Direkte kostnader på infrastrukturen øker med 635% for E6, 899% for Rv15 og 507% for jernbanen når klimaendringer tas med i beregningene. De modellerte farekartene i HEC-RAS viser at infrastrukturen vil stenges oftere, og dette fører til at de indirekte konsekvensene på infrastrukturen vil bli større.

## 7.1 Forslag til videre arbeid

I diskusjonsdelen ble det gjort greie for flere usikkerhetsmomenter. Ved å utvikle bedre metoder for å håndtere disse, vil man kunne oppnå mindre usikre resultater. Nedenfor følger forslag til videre studier.

- I denne oppgaven ble det laget en metode for å finne gjennomsnittlig varighet for overskridelse av ulike vannføringer. Metoden kan forbedres ved å undersøke om den tilpassede kurven, som beskriver hvordan den gjennomsnittlige overskridelsesvarigheten varierer for ulike terskelvannføringer, har en bestemt form, samt om det er noen faktorer ved vassdragene som avgjør formen. Dette kan gjøres ved å teste den utviklede metoden på flere ulike vassdrag.  
Et annet forslag til videre arbeid er å teste hvilken påvirkning tidsopløsningen har på resultatene. Dette vil gi informasjon om anvendbarheten til metoden.
- Ved å lage mer spesialiserte skadefunksjoner for vei og jernbane, kan en gjøre beregningene av direkte skade mer korrekte. Dette kan gjøres ved å innhente skadedata på infrastrukturen etter en flomhendelser og koble dette datasettet til variabler som vanndybde og vannhastighet. Størrelsen på variablene kan finnes ved å modellere den aktuelle flomhendelsen i en hydraulisk modell. Man kobler dermed de innhentede skadedatene til de modellerte variablene, som hastighet og varighet. Det finnes få skadefunksjoner som benytter hastighet som variabel. Ved å lage slike funksjoner en kunne øke treffsikkerheten til skadeberegningene.  
Skadefunksjonene bør også ta høyde for utforming og oppbygging av infrastrukturen. Slike forbedrede skadefunksjoner kan modelleres i GIS ved bruk av ulike buffersonestørrelser på infrastrukturen.
- Et annet forslag til videre arbeid er å undersøke hvordan nedetiden på infrastrukturen avhenger av flomvarighet og direkte skader. Og benytte denne nedetiden når det beregnes indirekte kostnader. Dette vil gjøre kostnadsestimatene mer realistiske, siden man kan forvente at nedetiden vil utgjøre en betydelig del av kostnaden tilknyttet indirekte skader.

## 8 Bibliografi

- Andersen, I. (2009, 29. Desember). 350 togpassasjerer fast på Otta i bitende kulde. VG. <https://www.vg.no/forbruker/reise/i/OngEIE/350-togpassasjerer-fast-paa-otta-i-bitende-kulde>
- Arrighi, C., Pregnotato, M., & Castelli, F. (2021). Indirect flood impacts and cascade risk across interdependent linear infrastructures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(6), 1955-1969.
- Askheim, S. (2021). Nilen. In M. Sæbø (Ed.), *Store norske leksikon*. Hentet 3. November 2021 fra <https://snl.no/Nilen>.
- Attinà, M., Basilico, A., Botta, M., Brancatello, I., Gargani, F., Gori, V., Wilhelm, F., & Menting, M. (2018). Assessment of unit costs (standard prices) of rail projects (CAPital EXpenditure). Luxembourg. *Publications Office of the European Union*.
- Bane NOR. (2021). Teknisk regelverk: Underbygning/Prosjektering og bygging/Drenering. [https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering\\_og\\_bygging/Drenering](https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Drenering)
- Banenor. (u.å.). *Dovrebanen*. Hentet 2. mars 2022 fra <https://www.banenor.no/reisende/Banene/Dovrebanen/>
- Bardal, K. G. (2018). *Fremkommelighet på høyfjellstrekninger* (Rapport 13 2018). Nordlandsforskning.
- Berg, H., Voksø, A., Grøttå, L., Repp, K., & Haddeland, I. (1996). *Flomsonekart arbeid i NVE* (Notat nr. 11 1996). NVE.
- Berg-Beckhoff, G., Wiedemann, P., Ádám, B., Schüz, J., Ølgaard, K. B., Andersen, P. T., Kabwama, S. N., & Nielsen, J. B. (2017). Widening the understanding of risk approaches by comparing definitions from different disciplines. In *Knowledge Management Strategies and Applications* (pp. 253-263). IntechOpen.
- Bjørnstad, S. W. (2014). *Hvilke styrker og svakheter finnes i Jernbaneverkets risikovurderinger av planoverganger?* [Master, Universitetet i Stavanger]. <https://banenor.brage.unit.no/banenor-xmlui/bitstream/handle/11250/196526/Masteroppgave.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Blindheim, S. (2016). *Årsaker til kostnadsøkninger i norske veiprojekt* (Oppdragsnr.:5156633). Norconsult. [https://www.nho.no/contentassets/db2308eef44f4eceba3d61fe5dc0c5fc/norconsult\\_arsaker-til-kostnadsokninger-i-norske-vegprosjekt.pdf](https://www.nho.no/contentassets/db2308eef44f4eceba3d61fe5dc0c5fc/norconsult_arsaker-til-kostnadsokninger-i-norske-vegprosjekt.pdf)
- Brox, G. (1995). *Flommen på Østlandet 1995* (Rapport 34 1995). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/rapport/1995/rapport1995\\_34.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/1995/rapport1995_34.pdf)

- Brunner, G. W. (2016a). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual* (Rapport CPD-69). US Army Corps of Engineers.  
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Brunner, G. W. (2016b). *HEC-RAS, River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0* (CPD-68A). US Army Corps of Engineers.  
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf>
- Brunner, G. W. (2021). *HEC-RAS, River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 6.0 Beta* (Rapport CPD-68A). US Army Corps of Engineers.  
[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 6.0 2D Modeling Users Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%206.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf)
- Byggeteknisk forskrift. (2017). *Byggeteknisk forskrift (TEK17) med veiledning* (TEK 17). Direktoratet for Byggkvalitet. <https://dibk.no/regelverk/byggeteknisk-forskrift-tek17/>
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. MCGraw Hiu.
- Colleuille, H. (2005). *Tiltaksvurdering mot oversvømmelser i Otta sentrum* (Rapport 12 2005). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2005/rapport2005\\_12.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2005/rapport2005_12.pdf)
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2010). *Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies* (Deliverable 2.1). SafeLand. 7th Framework. Programme Cooperation Theme.  
<https://www.ngi.no/download/file/5984>
- Courtney, C. (2018). *The nature of disaster in China: the 1931 Yangzi River Flood*. Cambridge University Press.
- De Jager, N. R., Thomsen, M., & Yin, Y. (2012). Threshold effects of flood duration on the vegetation and soils of the Upper Mississippi River floodplain, USA. *Forest Ecology and Management*, 270, 135-146.
- DPA International. (2021). Germany's flood rebuilding costs estimated in the billions. *DPA International*. Hentet 11. november 2021 fra <https://www.dpa-international.com/topic/germany-flood-rebuilding-costs-estimated-billions-urn%3Anewsml%3Adpa.com%3A20090101%3A210719-99-442470>
- Dr. Blasy - Dr. Øverland. (2019). *Hydrauliske beregninger Gudbrandsdalslågen*. NVE.
- Dr. Blasy - Dr. Øverland. (2020). *Flomsikring Otta*. NVE.  
<https://www.sel.kommune.no/f/i72919b28-c09e-4826-9120-368cc6496581/flomsikring-konsept-for-sikringstiltak-datert-31032020pdf.pdf>
- Drageset, T.-A. (2000). *Flomberegning for Otta og Gudbrandsdalslågen* (Rapport 04 2000). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/dokument/2000/dokument2000\\_04.pdf](https://publikasjoner.nve.no/dokument/2000/dokument2000_04.pdf)

- Engeland, K. (2016). *Flomdata* (Rapport 85 2016). NVE.  
[https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_85.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_85.pdf)
- Engeland, K. (2021). *A Short introduction to extreme value theory and flood frequency analysis*. Institutt for geofag. Universitetet i Oslo. [https://bibsys-k.alma.exlibrisgroup.com/leganto/readinglist/citation/12460258350002204?institute=47BIBSYS\\_UBO&auth=SAML](https://bibsys-k.alma.exlibrisgroup.com/leganto/readinglist/citation/12460258350002204?institute=47BIBSYS_UBO&auth=SAML)
- Environment Agency. (2018). *Estimating the economic costs of the 2015 to 2016 winter floods*. Environment Agency.  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/672087/Estimating\\_the\\_economic\\_costs\\_of\\_the\\_winter\\_floods\\_2015\\_to\\_2016.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/672087/Estimating_the_economic_costs_of_the_winter_floods_2015_to_2016.pdf)
- European Parliament. (2007). *DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=EN>
- Flügel, S., Halse, A. H., Hulleberg, N., Jordbakke, G. N., Veisten, K., Sundfør, H. B., & Kouwenhoven, M. (2020). *Verdsetting av reisetid og tidsavhengige faktorer* (Rapport 1762 2020). TØI. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=53108>
- Foudi, S., Osés-Eraso, N., & Tamayo, I. (2015). Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy*, 42, 278-292.
- Fylkesmannen i Innlandet. (2019). *Evalueringsrapporten etter flaumen i Skjåk kommune 14. og 15.oktober 2018*. Skjåk kommune. <https://www.statsforvalteren.no/siteassets/fm-innlandet/10-samfunnssikkerhet-og-beredskap/forebyggende-samfunnssikkerhet/evalueringer/evalueringsrapport-etter-flaumen-i-skjaak.pdf>
- Geovekst. (2022). *FKB-Bane*. GEONORGE. Hentet 16. februar 2022 fra <https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/fkb-bane/3165138f-1461-44fe-8b10-eac44e08a10a>
- Gervasi, A. A., Pasternack, G. B., & East, A. E. (2021). Flooding duration and volume more important than peak discharge in explaining 18 years of gravel–cobble river change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3194-3212.
- Gindrat, G. (2020). *GIS-based hazard and risk assessment of transportation infrastructure* [Master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,].
- Glad, P. A., Stenius, S., Leine, A.-L. Ø., Væringstad, T., Holmqvist, E., Dahl, M.-P. J., & Trondsen, E. (2022). *Veileder for flomberegninger* (Rapport 01 2022). NVE.  
[https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_01.pdf)
- Glommens og Laagens Brukereforening. (u.å.). *Regulering av Glommavassdraget i 100 år*.  
<https://glb.no/wp-content/uploads/2020/12/glb-100-ar-jubileumsskrift-oppslag.pdf>



- Habermann, N., & Hedel, R. (2018). Damage functions for transport infrastructure. *International journal of disaster resilience in the built environment*, 9(4/5), 420-434. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJDRBE-09-2017-0052/full/pdf?title=damage-functions-for-transport-infrastructure>
- Hall, J., & Blöschl, G. (2018). Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7), 3883-3901.
- Hallegatte, S. (2015). The indirect cost of natural disasters and an economic definition of macroeconomic resilience. *World Bank Policy Research Working Paper(7357)*.
- Hallenbeck, M. E., Goodchild, A., & Drescher, J. (2014). *Travel costs associated with flood closures of state highways near Centralia/Chehalis, Washington (WA-RD 832.1)*. Washington (State). Dept. of Transportation. [https://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/research\\_public\\_files/Travel%20Costs%20Associated%20with.pdf](https://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/research_public_files/Travel%20Costs%20Associated%20with.pdf)
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., & Guiot, J. (2018). Impacts of 1.5 C global warming on natural and human systems. *Global warming of 1.5 C. An IPCC special report*.
- Høydal, Ø. A., Larsen, C. K., Berg, H., & Øydvin, E. K. (2002). *Delprosjekt Selsmyrene* (Rapport 11 2002). NVE. [http://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2002/flomsonekart2002\\_11.pdf](http://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2002/flomsonekart2002_11.pdf)
- Høydal, Ø. A., Øydvin, E. K., & Asvall, R. P. (2000). *Delprosjekt Otta* (Rapport 5 2000). NVE. [http://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2000/flomsonekart2000\\_05.pdf](http://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2000/flomsonekart2000_05.pdf)
- Huizinga, J., De Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines*. Joint Research Centre.
- Jernbaneverket. (u.å.). *Vann på ville veier, Dovrebaneln, Utfordringer og utbredninger etter flommene i 2011 og 2013* (Presentasjon).
- Kartverket. (2022). *Høydedata*. Hentet 30. Januar 2022 fra <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>
- Kellermann, P., Schöbel, A., Kundela, G., & Thieken, A. H. (2015). Estimating flood damage to railway infrastructure—the case study of the March River flood in 2006 at the Austrian Northern Railway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), 2485-2496.
- Kleivane, I. (2011). *Flaumen i Sør-Noreg, juni 2011* (Rapport 11 2011). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/dokument/2011/dokument2011\\_11.pdf](https://publikasjoner.nve.no/dokument/2011/dokument2011_11.pdf)
- Kok, M., Huizinga, H., Vrouwenfelder, A., & Barendregt, A. (2004). Damage and casualties caused by flooding. *Highway and Hydraulic Engineering Dept., Delft, Netherlands*.

- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B., & Thieken, A. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1679-1692.
- Kreienkamp, F., Philip, S. Y., Tradowsky, J. S., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., & Chan, S. C. (2021). *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021*. World Weather Attribution.
- Lawrence, D. (2016). *Klimaendring og framtidige flommer i Norge* (Rapport 81 2016). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_81.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_81.pdf)
- Leine, A.-L. Ø. (2015). *Flomberegning for Gudbrandsdalsvassdraget* (Rapport 127 2015). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015\\_127.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_127.pdf)
- Matti, B., Dahlke, H. E., Dieppois, B., Lawler, D. M., & Lyon, S. W. (2017). Flood seasonality across Scandinavia—Evidence of a shifting hydrograph? *Hydrological Processes*, 31(24), 4354-4370.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.
- Merz, R., & Blöschl, G. (2003). A process typology of regional floods. *Water resources research*, 39(12).
- Messner, F. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods* (T09-06-01). FLOODsite - a 6th framework project. [http://www.floodsite.net/html/partner\\_area/project\\_docs/T09\\_06\\_01\\_Flood\\_damage\\_guidelines\\_d9\\_1\\_v2\\_2\\_p44.pdf](http://www.floodsite.net/html/partner_area/project_docs/T09_06_01_Flood_damage_guidelines_d9_1_v2_2_p44.pdf)
- Nadim, F. (2005). Administrative report: TC32—Engineering practice of risk assessment and management, Compte rendu sur la CT-32 Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,
- NEVINA. NVE. Hentet 4. januar 2022 fra <https://nevina.nve.no/>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (Second edition ed.). WILEY-BLACKWELL.
- Nied, M., Schröter, K., Lüdtke, S., Nguyen, V. D., & Merz, B. (2017). What are the hydro-meteorological controls on flood characteristics? *Journal of Hydrology*, 545, 310-326.
- Norsk Klimaservicesenter. (2021). *Klimaprofil Oppland*. <https://klimaservicesenter.no/kss/klimaprofiler/oppland>
- NOU 1996: 16. (1996). *Tiltak mot flom*. Nærings- og energidepartementet. <https://www.regjeringen.no/contentassets/21e6f5f6fe424757a8d418a33259c223/nou/pdfa/nou199619960016000dddpdfa.pdf>

- NOU 2006: 6. (2006). *Risikobildet*. Justis- og beredskapsdepartementet.  
<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2006-6/id157408/sec9>
- NTB. (2012). Dovrebanen stengt i opptil tre uker i Sør-Trøndelag. *Nettavisen*.  
<https://www.nettavisen.no/nyheter/dovrebanen-stengt-i-opptil-tre-uker-i-sor-trondelag/s/12-95-3355532>
- NVE. (2020a). Aktsomhetskart for flom.  
<https://www.nve.no/media/10583/metodebeskrivelse-aktsomhetskart-for-flom.pdf>
- NVE. (2020b). *Modul F1.002: Hvordan lese et vassdrag? – Grunnleggende vassdragshydraulikk*. NVE. Hentet 3. mars 2022 fra  
<https://www.nve.no/moduler/modul-f1-002-hvordan lese-et-vassdrag-grunnleggende-vassdragshydraulikk/>
- NVE. (2020c). *Oktoberflaum på Vestlandet og Otta 2018*. NVE. Hentet 3. mars fra  
<https://www.flomhendelser.no/20180637/oversikt>
- NVE. (2021). *Modul G1.002: Nytte/kost-analyse*. NVE. Hentet 8. mars 2022 fra  
<https://www.nve.no/moduler/modul-g1-002-nytte-kost-analyse/#nve>
- Olerud, K., Fuglesvedt, J. S., Kallbekken, S., & Lahn, B. (2021). FNs klimapanel. In B. Lahn (Ed.), *Store norske leksikon*. Hentet 18. September 2021 fra  
[https://snl.no/FNs klimapanel - IPCC](https://snl.no/FNs_klimapanel_-_IPCC).
- Olsen, A. S., Zhou, Q., Linde, J. J., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). Comparing methods of calculating expected annual damage in urban pluvial flood risk assessments. *Water*, 7(1), 255-270. <https://www.mdpi.com/2073-4441/7/1/255>
- Oppland Fylkeskommune. (u.å.). *Lågenplanen, Regional plan for Gudbrandsdalslågen med sidevassdrag*. <https://innlandetfylke.no/f/p1/ib8fff23e-54a2-48f9-80a5-932b0efba4df/regional-plan-for-gudbrandsdalslagen-med-sidevassdrag.pdf>
- Peereboom, I., Waagø, O., & Myhre, M. (2011). *Preliminary Flood Risk Assessment in Norway* (Rapport 07 2011). NVE.
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., Mach, K., Mintenbeck, K., O'Neill, B., & Pathak, M. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-working group discussions*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. Switzerland.
- Roald, L. A. (2013). *Flom i Norge*. Forlaget Tom & Tom.
- Roald, L. A. (2015). *Flommen på Østlandet i mai 2013* (Rapport 21 2015). NVE.  
[https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015\\_21.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_21.pdf)
- Samferdseldepartementet. (2006). *Statbudsjettet 2007 - spørsmål fra Transport- og kommunikasjonskomitéen. Spørsmål nr. 8, Jernbaneformål – Kostnad jernbanespor*. Regjeringen. <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/stoltenberg->

[ii/sd/Nyheter-og-pressemedlinger/nyheter/2006/statsbudsjettet-2007-sporsmal-fra-transp/id424163/](https://sd/Nyheter-og-pressemedlinger/nyheter/2006/statsbudsjettet-2007-sporsmal-fra-transp/id424163/)

- Schmidt-Thomé, P., & Kallio, H. (2006). Natural and technological hazard maps of Europe. *Special paper-geological survey of finland*, 42, 17.
- SDEA. (u.å.). *Les risques d'inondations*. Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle. Hentet 9. September 2021 fra <https://www.sdea.fr/index.php/fr/l-eau/les-inondations/les-risques-d-inondations>
- Siedler, C. E. (2015). *Samfunnsøkonomiske kostnader av Gudbrandsdalsflommen 2013* (Rapport 93 2015). [https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/bitstream/handle/11250/2498477/rapport2015\\_93.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/bitstream/handle/11250/2498477/rapport2015_93.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sildre. (2022). NVE. <https://sildre.nve.no/map>
- SJ. (2022). *Trondheim S – Oslo S*. Hentet 11. mars 2022 fra [https://www.sj.no/content/dam/nord/Dovrebanen\\_R22.pdf](https://www.sj.no/content/dam/nord/Dovrebanen_R22.pdf)
- Solberg, G. M. (2014, 7. juli 2014). Så mye koster det egentlig å bygge vei i Norge. *Teknisk Ukeblad*. <https://www.tu.no/artikler/sa-mye-koster-det-egentlig-a-bygge-vei-i-norge/231083#:~:text=%C2%ABNormale%C2%BB%20kostnader%20til%20vegutbygging&text=En%20oversikt%20etaten%20har%20gitt,omr%C3%A5det%2C%20og%20hvor%20veien%20bygges>
- SSB. (2020). *Jernbanetransport, 2019*. Hentet 27. februar 2022 fra <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/jernbane/aar/2020-06-04?fane=tabell#content>
- SSB. (2021a). *Arealbruk i tettsteder*. Hentet 2. november 2021 fra <https://www.ssb.no/statbank/table/04859/tableViewLayout1/>
- SSB. (2021b). *Jernbanetransport*. Hentet 27. februar 2022 fra <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/jernbanetransport>
- Statens Vegvesen. (2017). *Rask tilgang til NVDB-data i ArcMap*. Hentet 28. februar 2022 fra <https://www.vegvesen.no/2017/07/07/rask-tilgang-til-nvdb-data-i-arcmap/Sta>
- Statens Vegvesen. (2018). *Vegbygging* (Håndbok N200). Vegdirektoratet. <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n200-vegbygging-juli-2018.pdf>
- Statens Vegvesen. (2021). *Konsekvensanalyser* (Håndbok V712). Vegdirektoratet. <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v712-konsekvensanalyser-2021.pdf>

- Statens Vegvesen. (2022). *Vegkart*. Hentet 17. februar 2022 fra [https://vegkart.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/@211869,6860816,9/hva:!\(id~540\)~/valgt:1014991307:540](https://vegkart.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/@211869,6860816,9/hva:!(id~540)~/valgt:1014991307:540)
- Strupczewski, W., Kochanek, K., Bogdanowicz, E., & Markiewicz, I. (2013). Inundation risk for embanked rivers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3111-3125.
- Sund, P. H. (2016). *Rapport fra laserscanning* (Prosjekt nr. 6731). TerraTec. [https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5CChoydedata\\_orig%5Cvol8%5C1031%5Cmetadata%5CNVE%20Gudbrandsdalsl%C3%A5gen%202016\\_Projektrapport.pdf](https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5CChoydedata_orig%5Cvol8%5C1031%5Cmetadata%5CNVE%20Gudbrandsdalsl%C3%A5gen%202016_Projektrapport.pdf)
- Svensbakken, S. (2012). *Rapport om skadeflom i pinshelga 2011*. Statens vegvesen. [https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/190571/Rapport%20om%20skadeflom%20i%20pinshelga%202011\\_Statens%20vegvesen%20Region%20%20st.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/190571/Rapport%20om%20skadeflom%20i%20pinshelga%202011_Statens%20vegvesen%20Region%20%20st.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Tariq, M. A., Hoes, O. A., & Van de Giesen, N. C. (2014). Development of a risk-based framework to integrate flood insurance. *Journal of Flood risk management*, 7(4), 291-307.
- Tariq, M. A. U. R., Muttill, N., Rajabi, Z., Hussein, M., Shah, M. I., Shahid, M. L. U. R., Janjua, S., Farooq, R., & Ng, A. W. (2021). Development of a Hydrodynamic-Based Flood-Risk Management Tool for Assessing Redistribution of Expected Annual Damages in a Floodplain. *Water*, 13(24), 3562.
- Thorsnæs, G., & Mæhlum, L. (2021). Otta. In L. Mæhlum (Ed.), *Store Norske Leksikon*. Hentet 2. November 2021 fra <https://snl.no/Otta>.
- Tollan, A. (2020). Flom. In T. H. Bakken (Ed.), *Store norske leksikon*. Hentet 10. September 2021 fra <https://snl.no/flom>.
- Trøndelag i Tall. (u.å.). Persontransport på Jernbane. Hentet 28. februar 2022 fra <https://trondelagitall.no/statistikk/persontransport-pa-jernbane>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2013). *Flood risk management*, (IWR Rapport 2013-R-05). Institute for Water Resources. <https://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/2013-R-05.pdf>
- US Army Corps of Engineers. (2022). *HEC-RAS User's Manual*. US Army Corps of Engineers,. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/foreword>
- Van Ginkel, K. C., Dottori, F., Alfieri, L., Feyen, L., & Koks, E. E. (2021). Flood risk assessment of the European road network. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 1011-1027.
- Vanneuville, W., Gamanya, R., De Rouck, K., Maeghe, K., De Maeyer, P., & Mostaert, F. (2005). Development of a Flood Risk Model and applications in the management of

hydrographical catchments. *Proceedings of the Cartographic Cutting-Edge Technology for Natural Hazard Management, Dresden, Germany, 20-22.*

Varsom. (2021). Flommen i Tyskland. Hentet 12. desember 2021 fra

<https://www.varsom.no/nytt/nyheter-flom-og-jordskred/flommen-i-tyskland/>

Ventimiglia, U., Candela, A., & Aronica, G. T. (2020). A cost efficiency analysis of flood proofing measures for hydraulic risk mitigation in an urbanized riverine area. *Water*, 12(9), 2395.

Vy. (2022). Vy. Hentet 18. februar 2022 fra <https://www.vy.no/>

Ward, P. J., De Moel, H., & Aerts, J. (2011). How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12), 3181-3195.

Wathne, M., Skoglund, M., & Eggestad, H. O. (1999). *Samfunnkostnader på grunn av flom i vassdrag* (HYDRA-rapport nr. R02). NVE.

<https://publikasjoner.nve.no/hydra/rapport/r02.pdf>