

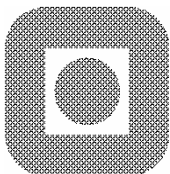
Utforming av innløpsområdet til stikkrenner for å
hindre gjenfylling under intense nedbørsperioder

(Design of the area in front of culverts to prevent
blocking during periods with heavy precipitation)

Hovedoppgave vår 2005

for

Sissel Alne Amundsen



INSTITUTT FOR BYGG ANLEGG OG TRANSPORT
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NTNU

Reg. nr.:



Oppgavens tittel: Utforming av innløpsområdet til stikkrenner for å hindre gjenfylling under intense nedbørsperioder	Dato: 06.06.05		
	Antall sider (inkl. bilag): 109 s.		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Sissel Alne Amundsen			
Faglærer/veileder: Professor Harald Norem			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Hensikten med oppgaven er å komme fram til gode utforminger for innløpsområdet til stikkrenner for å hindre gjentetting av disse. Oppgaven omfatter et innledende kapittel der teorien rundt erosjon, massetransport og sedimentasjon gjennomgås. Deretter behandles et modellforsøk og praktisk feltarbeid.</p> <p>Ved hjelp av modellforsøk er det undersøkt hvordan massetransport påvirkes av variasjoner i lengde på grøftebredde, plassering av stikkrenne i forhold til strømningsretningen, ulik fyllingshøyde og bruk av bremseklosser.</p> <p>I feltarbeidet er det utarbeidet forslag til utbedring av en flomutsatt strekning i Sandeid, Vindafjord kommune.</p>
--

Stikkord:

1. Massetransport
2. Erosjon
3. Innløpsutforming
4. Modellforsøk

(sign.)



HOVEDOPPGAVE

VÅREN 2005

for

Sissel Ane Amundsen

Utforming av innløpsområdet til stikkrenner for å hindre gjenfylling under intense nedbørsområder

Design of the area in front of culverts to prevent blocking during periods with heavy precipitation

Bakgrunn

Massetransport i nedføringsrenner fram til innløp av stikkrenner og kulverter representerer et stort problem for driften av vegnettet i enkelte utsatte områder. Dette ser ut til å være et økende problem de siste årene med større hyppighet av intens nedbør og store medbørsmengder på snødekket mark.

Målsettingen med denne oppgaven er å gjennomføre modellforsøk for å studere hvordan massetransporten i nedløpsrennene kan fanges opp og en derved kan redusere faren for at stikkrenner og kulverter ikke blir tettet av de transporterte massene. I tillegg til modellforsøkene skal kandidaten også utarbeide forslag til utbedring/sikring av en utsatt vegstrekning i Rogaland.

Oppgave

Oppgaven er delt inn i to deler. Den mest omfattende er modellforsøk med utforming og plassering av sedimentasjonsbasseng, andre aktuelle tiltak som kan hindre massene å nå fram til innløpet og vurdering av å parallellforskyve stikkrennene i forhold til nedløpsrennene. Modellforsøkene gjennomføres i laboratoriene til Institutt for vann og miljø.

I forbindelse med modellforsøkene kreves det gjennomført:

- Vurdering av modellover som er aktuelle for å kunne overføre resultatene til praktiske formål, og for å kunne velge modellmålestokk.
- Utarbeide forslag til et forsøksprogram
- Gjennomføring og analyse av forsøkene

Den praktiske delen av oppgaven omfatter befaringer av en utsatt vegstrekning i Rogaland og utarbeiding av forslag til sikring av vegene på den utsatte strekningen.

Generelt

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis. Eventuelle justeringer må skje i samråd med veileder og faglærer ved instituttet (samt med ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt).

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidingen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside
- tittelside med ekstrakt og stikkord, (mal til forside og tittelside finnes på instituttets hjemmesider)
- sammendrag, innholdsfortegnelse inkl. oversikt over vedlegg og bilag
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger
- besvarelsen skal ha komplett paginering

Besvarelsen med underliggende materiale leveres også i digital form.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og hovedoppgave ved Institutt for bygg- og anleggsteknikk».
(<http://www.ivt.ntnu.no/bat/undervisning/rapportveiledning.pdf>)

I tillegg til selve rapporten skal det innleveres en kortfattet (tilsv. 1-2 A4-sider inkl. evt. illustrasjoner) populærvitenskapelig oppsummering av arbeidet, beregnet for publisering på internettet. Denne oppsummeringen leveres elektronisk i form av html-fil og bør redegjøre for hensikten med arbeidet og for gjennomføringen og de vesentligste resultater og konklusjoner av arbeidet. Oppsummeringen innpasses i html-mal gitt av instituttet.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet som om det var utført av en ansatt, såfremt annet ikke er avtalt på forhånd.

HMS:

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet.

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i Retningslinje for HMS ved feltarbeid og –kurs, tokt, befaringer og ekskursjoner m.m. (Kapittel 7.13 i NTNUs HMS-Håndbok). Studenten skal i tillegg få utdelt brosjyren Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU. Begge dokumentene er tilgjengelig på fakultetets HMS-sider på internett (<http://www.ivt.ntnu.no/adm/hms/>).

Instituttet anbefaler at studenten tegner egen ulykkesforsikring. Velferdstinget og SiT har forhandlet frem en forsikringsordning spesielt tilpasset studenter (se fakultetets HMS-sider: <http://www.ivt.ntnu.no/adm/hms/>).

Økonomisk støtte/SVV-avtale:

I samsvar med samarbeidsavtalen mellom Statens vegvesen (SVV) og NTNU får kandidaten utbetalt et beløp på 10.000 kr ved innlevering av oppgaven for legitimerede og ulegitimerede utlegg. NTNU videresender 1 eksemplar til h.h.v Statens vegvesen region Midt og Vegdirektoratet.

Innleveringsfrist:

Arbeidet med oppgaven starter mandag 10. januar 2005, og skal gjennomføres i løpet av 21 uker (inkl 1 uke ferie/bevegelige helligdager).

Besvarelsen i original (uinnbundet) og fire innbundne kopier, samt html-oppsummering og besvarelsen i digital form skal leveres senest mandag 6. juni 2005.

Veileder ved NTNU: Professor Harald Norem

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursionsjoner skal NTNUs HMS-regler følges. Studenten bekrefter dette med sin signatur samt gjennom å krysse av og følge punktene under.

- Jeg bekrefter at jeg har lest Retningslinje for HMS ved feltarbeid og –kurs, tokt, befaringer og ekskursionsjoner.
- Jeg bekrefter å ha mottatt brosjyren Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU

Dato: 10. januar 2005

Sissel Alne Amundsen

Harald Norem

Stud.techn.

Faglærer
Institutt for bygg, anlegg og transport

Forord

Denne hovedoppgaven er utført ved Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU, våren 2005. Oppgaven bygger på prosjektoppgaven ”Drenering av vegens sideområder. Tiltak mot erosjon og sedimentasjon” ved NTNU høst 2004 utført av undertegnede.

Hovedoppgaven er utført i samarbeid med Vegdirektoratet, Trondheim og Statens vegvesen, Haugaland og Sunnhordaland distriktsvegkontor. En stor takk rettes til Vegdirektoratet som har gjort modellforsøk mulig ved å finansiere byggingen av modellen.

I forbindelse med oppgaven har det blitt utført befarings langs en strekning på Rv 46 Sandeid i Vindafjord kommune. Jeg vil med dette rette en takk til Tønnes Frøiland, ved Haugaland og Sunnhordaland distriktsvegkontor, for tilrettelegging og muliggjøring av den praktiske delen av oppgaven. En stor takk rettes til Helge Bakka, ved Haugaland og Sunnhordaland distriktsvegkontor, for god hjelp under befarings på området. I tillegg vil jeg takke Tor Gunnar Skaar, Teknisk sjef i Vindafjord kommune, og Oddvar Tveit i Mesta som bidro med gode lokalkunnskaper og erfaringer.

Til slutt rettes en stor takk til professor Harald Norem for veiledning og engasjement i oppgaven.

Trondheim 6. juni 2005

Sissel Alne Amundsen

Sammendrag

Erosjon, massetransport og sedimentasjon omfatter de naturlige prosessene som løsriver, transporterer og avsetter masse. Den primære årsaken til erosjon og sedimentasjon er nedbør og avrenning. Det er dermed et hydrodynamisk problem der de eroderende kreftene er strømmende vann.

Det er ulike strømmingssituasjoner som initierer erosjon. Ved strømming som overflatevann kan overførte skjærspenninger mellom vannet og overflaten forårsake erosjon. Frambrudd av grunnvann i en skråning kan medføre erosjon og oppstår enten som følge av lagdelt jord eller konsentrasjon av strømlinjer i skråningsfot.

Både modellforsøk og befaring av flomutsatt strekning er konsentrert rundt situasjon med strømming som overflatevann og tilhørende erosjon og massetransport. Fokuset er rettet mot bunnlast fordi det er denne transportformen som forårsaker størst skade på vegnett og tilstøtende områder ved avsetting.

For å få en bedre forståelse av hvordan massetransport påvirker dreneringssystemet er det gjennomført modellforsøk. Hensikten var å finne gode innløpsutforminger for å hindre at bunnlast avsettes i innløpsområdet til stikkrenner.

Modellforsøket har undersøkt hvordan massetransport og avsetting påvirkes ved ulike oppsett. Oppsettene varierer med ulike faktorer og kombinasjoner av disse og kan oppsummeres til:

- Plassering av stikkrenne
- Variasjon av grøftebredde
- Bruk av energidrepere
- Ulik fyllingshøyde

I modellforsøket er to ulike strategier for massetransport undersøkt. Den første strategien innebærer at stikkrennen er selvrensende og massen blir fraktet direkte gjennom stikkrennen uten å avsettes. Den andre strategien går ut på å anlegge et sedimentasjonsbasseng for å avsette masse før innløpet.

Resultater fra modellforsøkene har vist at en strategi med utfelling av masse før innløpet er mindre sårbar enn en strategi med selvrensende stikkrenne. For at massen skal bli fraktet direkte gjennom stikkrennen, uten å avsettes, kreves en jevn og stabil jetstrøm og en minste kritisk vannmengde. I naturen er det sjelden at jetstrømmen opptrer stabilt. Det er alltid fare for at drivgods setter seg fast i strømningsretningen og framprovoserer et vannstandssprang eller endrer retningen på jetstrømmen. Dermed kan ukontrollert avsetting fås i og ved stikkrenne. I tilfeller der en har stor plassmangel kan derimot denne strategien være et godt alternativ.

Best resultater i modellforsøket er oppnådd ved avsetting av masse før innløpet. For stikkrenne i strømningsretning kreves bruk av bremseklosser og minimumslengde på over 12 meter i natur for å sikre tilstrekkelig kapasitet i rennen. Dette er dermed en plasskrevende utforming. Ved en slik type utforming anbefales det å bruke et reserveløp som er forskjøvet minimum 10 meter i forhold til strømningsretningen. På denne måten har en reservekapasitet i tilfelle hovedløpets kapasitet skulle bli redusert.

Den mest pålitelige strategien for avsetting av masse er å anlegge en stikkrenne som er forskjøvet minimum 6 meter fra strømningsretningen. Dette oppsettet ga ingen gjentetting av stikkrennen. Noe masse ble i enkelte tilfeller fraktet over vegen, men brukes en høy fylling eller bassenglengde på 12 meter vil dette problemet ikke oppstå. Dette er derfor en anbefalt utforming med tanke på å hindre gjentetting.

Befaring ble utført på en flomutsatt strekning i Sandeid, Vindafjord kommune. Med bakgrunn i sensommerens flom som rammet området, ble strekningen analysert og utbedringer foreslått. Under flom-

men var det bekkeløpene som utgjorde den største faren for veg og eiendom. Vannet flommet over bekkeløpene og masse ble erodert og fraktet med vannstrømmen. Ut fra dette ble det valgt å fokusere på å kontrollere massetransporten, konsentrere avrenningen fra terrenget og sikre strømningsvegene. Prioriterte tiltak ble dermed å:

- anlegge sedimentasjonsbasseng for å fange opp transportert masse
- sikre at dreneringssystemet og bekkeløpene har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna dimensjonerende vannmengder
- avskjære avrenning fra sideterreng ved å anlegge terrenggrøft
- sikre bekkeløp og avskjærende terrenggrøft mot erosjon

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag.....	ii
Figurliste.....	vi
Tabelliste.....	ix
Symbolliste.....	x
1 Innledning.....	1
2 Strømningslære.....	2
2.1 Teorier for kanalstrømning.....	2
2.1.1 Frispeilstrømning.....	2
2.1.2 Vannstandssprang.....	4
2.2 Erosjonskriterier.....	5
2.2.1 Erosjonsskader.....	5
2.2.2 Årsaker til at erosjon oppstår.....	7
2.2.3 Krefter som virker på bunnpartikler.....	7
2.2.4 Grense for bevegelse av bunnpartikler.....	10
2.3 Massetransport.....	12
2.3.1 Karakteristisk ved bunnlast.....	13
2.3.2 Partikkelstørrelse.....	13
2.3.3 Formelverk for bunnlast.....	14
2.4 Sedimentasjon.....	15
2.4.1 Fallhastighet.....	16
2.4.2 Sedimentasjonslengde.....	18
3 Modellforsøk.....	20
3.1 Hensikt.....	20
3.2 Modellover.....	20
3.2.1 Geometrisk likedannethet.....	20
3.2.2 Kinematisk likedannethet.....	21
3.2.3 Dynamisk likedannethet.....	22
3.2.4 Karakteristiske verdier for natur.....	23
3.2.5 Oppfylling av modellovene.....	23
3.3 Beskrivelse av modellforsøket.....	24
3.3.1 Tekniske spesifikasjoner.....	24
3.3.2 Forsøksprosedyre.....	30
3.3.3 Målinger ved forsøk.....	32
4 Resultater fra modellforsøk.....	34
4.1 Sentrert hovedløp.....	34
4.1.1 Lav fylling.....	35
4.1.2 Høy fylling.....	42
4.2 Forskjøvet hovedløp.....	47
4.2.1 Lav fylling.....	47
4.2.2 Høy fylling.....	52
4.3 Hovedløp og reserveløp.....	55
4.3.1 Lav fylling.....	56
4.4 Oppsummering.....	59
4.5 Feilkilder.....	65
5 Drøfting og erfaringer.....	68
6 Feltarbeid i Sandeid, Vindafjord kommune.....	71
6.1 Analyse av området.....	71
6.1.1 Flom i Sandeid.....	72
6.2 Beskrivelse av detaljpunkter.....	75
6.2.1 Flomberegninger.....	86

6.3	Tiltaksstrategier.....	91
6.3.1	Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 1	92
6.3.2	Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 2	99
7	Konklusjon.....	104
	Referanseliste	108

Figurliste

Figur 2-1 Oversikt over ulike strømnings situasjoner (NVE, 1998)	2
Figur 2-2 Hastighetsfordeling	3
Figur 2-3 Skisse av et vannstandssprang	5
Figur 2-4 Framprovosert vannstandssprang ved bruk av bremseklosser	5
Figur 2-5 Overflateerosjon (SVV, 2005).....	6
Figur 2-6 Grunnvannserosjon (SVV, 2005).....	6
Figur 2-7 Overflateglidning (SVV, 2005).....	6
Figur 2-8 Drag- og løftekraft (NVE, 1998).....	8
Figur 2-9 Likevekt av partikkel i skråning utsatt for overflatestrømning	9
Figur 2-10 Shields diagram (NVE, 1998).....	11
Figur 2-11 Hjulstrøms diagram (NVE, 1998)	12
Figur 2-12 Prinsipp for kontinuitet.....	18
Figur 2-13 Sedimentasjonslengde	18
Figur 2-14 Strømnings situasjon	19
Figur 3-1 Planskisse av modellen.....	24
Figur 3-2 Prinsippskisse av modellen.....	25
Figur 3-3 Stikkrenne med utløpskontroll	26
Figur 3-4 Tverrsnitt av vegelement med fyllingshøyde 0,15 m	27
Figur 3-5 Vegelement med og uten stikkrenne for fyllingshøyde 0,15 m.....	28
Figur 3-6 Tverrsnitt av vegelement med fyllingshøyde 0,25 m	28
Figur 3-7 Utstyr brukt under forsøk. Vannføringsavleser i bildet til venstre og vibratormaskin i bildet til høyre	30
Figur 3-8 Modellelementene varieres både i tverr- og lengderetning	31
Figur 3-9 Plassering av bremseklosser	31
Figur 3-10 Målinger ved forsøk	33
Figur 4-1 Sentrert hovedløp med 30 cm basseng. Bildet til høyre viser oppsett med bremseklosser ...	35
Figur 4-2 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	36
Figur 4-3 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	36
Figur 4-4 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	37
Figur 4-5 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	37
Figur 4-6 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	38
Figur 4-7 Oppsett av 90 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	38
Figur 4-8 Oppsett av 90 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	39
Figur 4-9 Profil av senterlinjen for sentrert hovedløp med bremseklosser	40
Figur 4-10 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med sentrert hovedløp	41
Figur 4-11 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp.....	41
Figur 4-12 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	42
Figur 4-13 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	42
Figur 4-14 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	43
Figur 4-15 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre	43

Figur 4-16 Oppsett av 90 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	44
Figur 4-17 Oppsett av 90 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	44
Figur 4-18 Profil av senterlinjen for sentrert hovedløp med og uten bremseklosser.....	45
Figur 4-19 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med sentrert hovedløp	46
Figur 4-20 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp.....	46
Figur 4-21 Forskjøvet hovedløp med 60 cm basseng. Bildet til venstre viser lav fylling og bildet til høyre viser høy fylling.	47
Figur 4-22 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	48
Figur 4-23 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	48
Figur 4-24 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	48
Figur 4-25 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	49
Figur 4-26 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med og uten bremseklosser	50
Figur 4-27 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med forskjøvet hovedløp	51
Figur 4-28 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp	51
Figur 4-29 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	52
Figur 4-30 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	52
Figur 4-31 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	53
Figur 4-32 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med og uten bremseklosser	54
Figur 4-33 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med forskjøvet hovedløp	55
Figur 4-34 Hovedløp og reserveløp for henholdsvis 30 cm og 60 cm basseng.....	56
Figur 4-35 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	56
Figur 4-36 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	57
Figur 4-37 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre.....	57
Figur 4-38 Profil av senterlinjen for hovedløp og reserveløp med bremseklosser	58
Figur 4-39 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med hovedløp og reserveløp.....	59
Figur 4-40 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp	59
Figur 4-41 Vannstandssprang under forsøk med sentrert hovedløp, 30 cm sedimentasjonsbasseng og bruk av bremseklosser. Lav fylling til venstre og høy fylling til høyre	60
Figur 4-42 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk utført med sentrert hovedløp og Vassfjell 8-11	61
Figur 4-43 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp og Vassfjell 8-11	62
Figur 4-44 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med masse Vassfjell 8-11 med og uten bremseklosser.....	62
Figur 4-45 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp og Vassfjell 8-11	63
Figur 4-46 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk utført med forskjøvet hovedløp og Vassfjell 16-22	63
Figur 4-47 Profil av senterlinjen for "hovedløp og reserveløp" og "sentrert hovedløp" med bremseklosser.....	64
Figur 4-48 Andel masse i sandfang for "hovedløp og reserveløp" og "sentrert hovedløp" og Vassfjell 8-11.....	64
Figur 4-49 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for lav fylling med 60 cm sedimentasjonsbasseng.....	65

Figur 4-50 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for høy fylling med 60 cm sedimentasjonsbasseng.....	65
Figur 6-1 Kart over Sandeid med omkringliggende områder.....	71
Figur 6-2 Oversikt over området som er analysert.....	72
Figur 6-3 Oversikt over flomområdet fra Sandeid sentrum (Skaar, 2005).....	73
Figur 6-4 Avrenning i Rødneelva (Skaar, 2005).....	73
Figur 6-5 Grautåbekken etter delvis opprydding av riksveg (Skaar, 2005).....	74
Figur 6-6 Sandsvegen ødelagt av flom (Skaar, 2005).....	74
Figur 6-7 Utvasking av masse og undergraving av bolighus.....	75
Figur 6-8 Sikring mot vann- og steinsprut fra Grautåbekken ved hjelp av trafikkskilt.....	75
Figur 6-9 Plassering av detaljpunkter.....	76
Figur 6-10 Bekkeutløp nedstrøms kommunal veg. Bildet til høyre viser erosjonsskadene pådratt etter flommen.....	77
Figur 6-11 Bekkeløp og inntak ved riksveg.....	78
Figur 6-12 Bekkeinntak.....	78
Figur 6-13 Plastret bekkeløp.....	79
Figur 6-14 Plastret bekkeløp og innløp.....	79
Figur 6-15 Bekkeløp og innløp for stikkrenne under riksveg.....	80
Figur 6-16 Tilstøtende eiendom til riksveg. Bildet til høyre viser bekkeløpet på nedstrøms side.....	80
Figur 6-17 Innløp og utløp for stikkrenne på kommunal veg.....	81
Figur 6-18 Bekkeløp oppstrøms riksveg. Bildet til høyre viser grøft langs riksveg.....	81
Figur 6-19 Bekkeinntak og utløp.....	82
Figur 6-20 Bekkeløp og innløp.....	82
Figur 6-21 Bekkeløp oppstrøms riksvegen.....	83
Figur 6-22 Innløp.....	83
Figur 6-23 Grautåbekken.....	84
Figur 6-24 Det ”gamle” bekkeleie ligger brakk.....	85
Figur 6-25 Innløp for Grautåbekken og innløp for å ta unna avrenning fra vegbanen.....	86
Figur 6-26 Plastret bekkeløp og skade nedstrøms riksveg.....	86
Figur 6-27 Nedslagsfelt for detaljpunktene.....	87
Figur 6-28 IVF-kurve for Opstveit nedbørsstasjon (Isaksen, 2005).....	89
Figur 6-29 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 1.....	93
Figur 6-30 Grøfteprofil for riksveg (SVV, 2005).....	94
Figur 6-31 Skisse av utvidelse av innløpsbasseng.....	95
Figur 6-32 Skisse av terrenggrøfter ovenfor kommunal veg.....	95
Figur 6-33 Tverrsnitt av terrenggrøft (Norem, 1998).....	96
Figur 6-34 Vannføringsdiagram for grøft med flat bunn (SVV, 2005).....	96
Figur 6-35 Skisse av sedimentasjonsbasseng.....	97
Figur 6-36 Tverrsnitt av sedimentasjonsbasseng.....	97
Figur 6-37 Skisse av sedimentasjonsbasseng, terrenggrøft og utspredning av bekkeløp.....	98
Figur 6-38 Lengdeprofil av Grautåbekken.....	99
Figur 6-39 Tverrsnitt av Grautåbekken nedstrøms riksveg.....	99
Figur 6-40 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 2.....	100
Figur 6-41 Skisse av sedimentasjonsbasseng. Bildet til høyre viser kun deler av basseng ved innløpet.....	101
Figur 6-42 Skisse av terrenggrøft og utspredning av bekkeløp.....	102

Tabelliste

Tabell 2-1 Oversikt over typiske verdier for Mannings tall (Crowe m.fl., 2001)	4
Tabell 2-2 Oversikt over kornstørrelser (Emdal, 1999)	13
Tabell 2-3 Utregning av bunnløst etter Peter-Meyers formel.....	14
Tabell 2-4 Verdier brukt ved beregning av fallhastighet.....	17
Tabell 2-5 Sedimentasjonshastighet for partikler. Hastighet angitt i m/døgn ved 20°C (SVV, 1998).	17
Tabell 2-6 Verdier brukt ved beregning av sedimentasjonslengde	19
Tabell 3-1 Oversikt over verdier for natur og modell	23
Tabell 3-2 Oversikt over i hvilken grad modellmålestokkene er oppfylt.....	24
Tabell 3-3 Utregning av vannføring.....	25
Tabell 3-4 Tekniske spesifikasjoner for modell	25
Tabell 3-5 Utregning av kapasitet til stikkrenne	26
Tabell 3-6 Tekniske spesifikasjoner for vegelement med fyllingshøyde 0,15 m.....	27
Tabell 3-7 Tekniske spesifikasjoner for vegelement med fyllingshøyde 0,25 m.....	28
Tabell 3-8 Utregning av teoretisk vannstand i basseng.....	29
Tabell 3-9 Utregning av sedimentasjonslengde	29
Tabell 3-10 Forsøksprogram for vegelement med høyde 15 cm.....	31
Tabell 3-11 Forsøksprogram for vegelement med høyde 25 cm.....	32
Tabell 5-1 Største tillatte fyllingshøyde uten rekkverk ved fall 1:2 (SVV, 2003)	68
Tabell 5-2 Største tillatte fyllingshøyde uten rekkverk ved fall brattere enn 1:1,5 (stup) (SVV, 2003)	69
Tabell 6-1 Nedslagsfelt	87
Tabell 6-2 Utregning av tidsfaktor	88
Tabell 6-3 Avlesing av nedbørsintensitet for 50 års returperiode	89
Tabell 6-4 Avrenningsfaktor C for landbruksområder (Goldman m.fl., 1986).....	90
Tabell 6-5 Utregning av avrenning	90
Tabell 6-6 Krav til dimensjon på stikkrenne (Berg m.fl., 1992)	90
Tabell 6-7 Oppfylting av krav ved dimensjonering etter innløpskontroll.....	91
Tabell 7-1 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med sentrert hovedløp	105
Tabell 7-2 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med hovedløp og reserveløp.....	105
Tabell 7-3 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med forskjøvet hovedløp	106

Symbolliste

Matematiske symboler:

∂	derivasjonsoperator
d	infinitesimalt inkrement

Latinske symboler:

a	akselerasjon
A	areal
b	bredde
C	konsentrasjon, avrenningsfaktor
C_D	dragkoeffisient
C_L	løftekoeffisient
C_s	Shields tall
d	diameter
d_{50}	median kornstørrelse
d_c	kritisk kornstørrelse
d_s	partikkelstørrelse
D	kulens nettotyngde
F_D	dragkraft
F_F	friksjonskraft
F_L	løftekraft
g	tyngdeakselerasjon
g_b	bunnlast målt som vekt pr enhet av tid og bredde
h	høyde
H	hødetap, høydeforskjell
H_f	friksjonstap
H_i	innløpstap
H_u	utløpstap
i	dimensjonerende nedbørsintensitet
I	bunnhelning
L	lengde
L_r	geometrisk skaleringsforhold
k	permeabilitet, formkonstant
k_i	innløpskoeffisient
k_u	utløpskoeffisient
k_1	konstant bestemt av kornform
k_2	konstant bestemt av kornform
K	von Karmans konstant (0,4), treghetskraft
M	masse
M	Mannings tall
P	våt omkrets
q	vannføring per løpemeter
Q	vannføring
R	hydraulisk radius =A/P
s	spesifikk vekt av partikler = γ_s/γ_v
t_c	tidsfaktor
v	hastighet
v_*	skjærhastighet
v_*^k	kritisk skjærhastighet
v_k	kritisk hastighet

v_r	kinematisk skaleringsforhold
V	hastighet, volum
W	tyngde
W_n	netto tyngde (vekt)
x	koordinat
X_c	avsetningslengde
z	koordinat, avstand fra bunnen
z_0	ruhet

Greske symboler:

α	skråningshelning
Δ	inkrement
Φ	hjelpstørrelse i Meyer-Peters formel
γ_v	romvekt av vann
γ_s	romvekt av partikler
φ	friksjonsvinkel
μ	dynamisk viskositet
ν	viskositet
ρ	tetthet
ρ_f	væskens tetthet
ρ_{kule}	kulens tetthet
ρ_s	partiklenes tetthet
ρ_v	tettheten til vann
τ_c	kritisk skjærspenning
τ_0	skjærspenning langs bunnen
ω	fallhastighet
Ψ	hjelpstørrelse i Meyer-Peters formel

1 Innledning

Erosjon og massetransport er naturlige prosesser som kan forårsake store skader på vegnett og tilstøtende områder. Ved store nedbørmengder kan vannets gravende effekt og transportevne føre til at masse blir løsrevet, fraktet og avsatt i sårbare områder. Avsettes denne massen ved inntak til stikkrenner kan kapasiteten svekkes i så stor grad at vannet flommer over. På grunn av hyppigere og større nedbørsintensiteter de senere årene har gjentetting av stikkrenner blitt et økende problem.

Det er begrenset kunnskap om hvordan man på en effektiv måte kan forebygge gjentetting av stikkrenner. Dette er en problemstilling som krever mer oppmerksomhet for å finne gode løsninger for å kontrollere massetransporten. Formålet med oppgaven har derfor vært å sette fokus på denne problematikken. Gjennom modellforsøk og praktisk befaring har målet vært å komme frem til bedre planlegging og utforming av innløpsområdet til stikkrenner for å hindre gjentetting av disse.

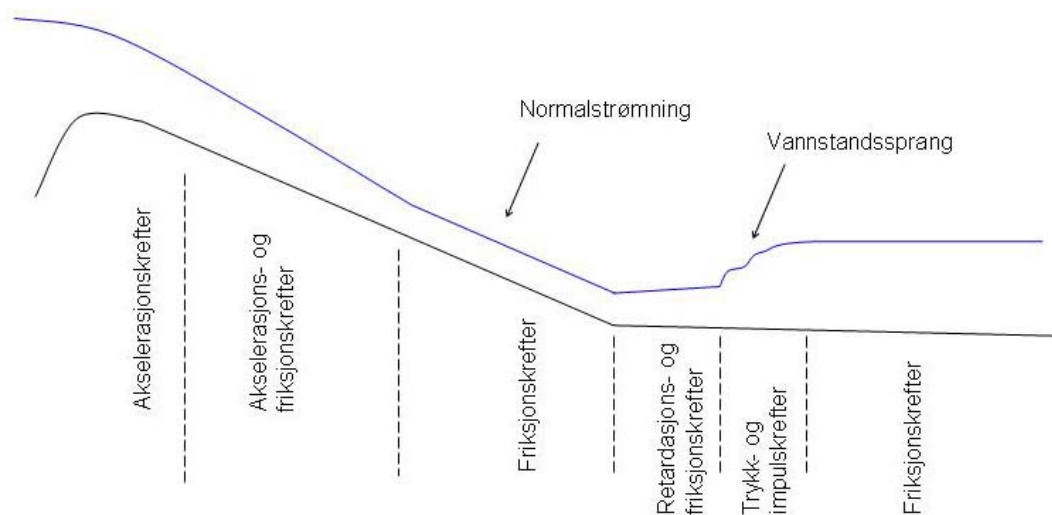
Denne hovedoppgaven er delt inn i tre deler. I første del belyses teorien omkring strømning, erosjon, massetransport og sedimentasjon. Andre del omhandler praktiske modellforsøk der ulike oppsett er undersøkt. Siste del omfatter befaring og forslag til utbedringer for en flomutsatt strekning i Sandeid, Vindafjord kommune.

2 Strømningslære

Dette kapitlet tar for seg grunnleggende hydrauliske begrep, prinsipp og strømningsformler som er knyttet opp mot modellforsøket. I tillegg skal teorien rundt erosjon, massetransport og sedimentasjon gjennomgå. Denne teorien ligger til grunn for modellforsøket som er utført.

2.1 Teorier for kanalstrømning

Figur 2-1 viser ulike strømnings situasjoner som kan forekomme i et sammensatt kanalsystem. Når vann strømmer over en terskel vil vannet akselerere og strømningsbildet vil da være bestemt av treghets- og tyngdekraftene. Etter hvert får friksjonen en større betydning og strømningsbildet vil være bestemt av både akselerasjons- og friksjonskreftene. Vannhastigheten vil øke inntil friksjonen er så stor at den energien som går tapt tilsvarende tilført, potensiell energi. Bunn og vannspeil vil da være parallelle og denne strømnings situasjonen er kalt normalstrømning. Ved overgang fra bratt til slakere kanal vil vannmassene bli retardert. Er helningen slak nok vil det kunne oppstå diskontinuiteter i vannspeilet, kalt vannstandssprang. Her er det trykk- og impuls kreftene som dominerer. Nedstrøms vannstandsspranget vil strømnings situasjonen være bestemt av forholdene ved utløpet av kanalen. Er kanalen lang nok vil det igjen oppstå normalstrømning. (NVE, 1998)



Figur 2-1 Oversikt over ulike strømnings situasjoner (NVE, 1998)

2.1.1 Frispeilstrømning

Frispeilstrømning innebærer at vi har strømning i et åpent system med fritt vannspeil, det vil si strømning som overflatevann. Den hydrauliske trykklinjen faller sammen med vannspeilet og trykket her er atmosfærisk.

Strømning av overflatevann er en turbulent strømning, men laminær strømning kan opptre i det nedste sjiktet av vannhøyden. I turbulent strømning beveger vannpartiklene seg i uregelmessige baner omkring hovedbanen, mens i laminær strømning glir partiklene i parallelle sjikt som ikke blandes. Overgangen mellom disse ulike strømmingene er gitt av Reynolds tall:

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (2-1)$$

der

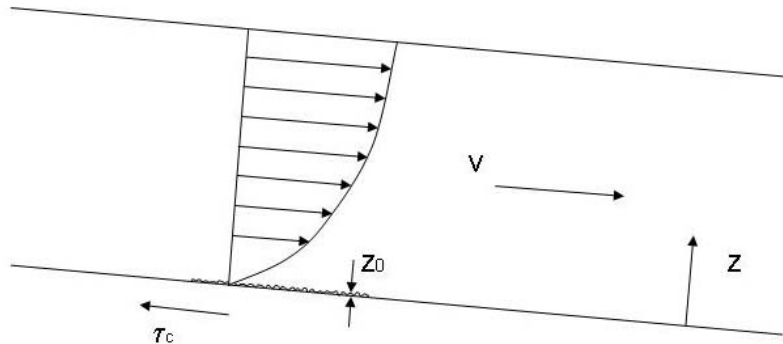
v = hastighet [m/s]

L = lengde, for eksempel dybden [m]

ν = vannets viskositet (ca. 10^{-6} m²/s)

Når Re er større enn en grenseverdi som varierer med geometrien er strømmen turbulent. Brukes vannedybden som lengden L er strømmen helt turbulent når $Re > 12\,500$. (NVE, 1998)

For strømning langs en fast grenseflate er hastigheten inne ved flaten null og øker hurtig med avstanden til flaten og mot det frie vannspeilet. For turbulent strøm vil hastighetsfordelingen være som vist i Figur 2-2.



Figur 2-2 Hastighetsfordeling

Hastighetsprofilet er gitt ved:

$$v = \frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2-2)$$

der

- z_0 = ruheten [m]
- z = avstanden fra bunnen [m]
- κ = von Karmans konstant (0,4)
- v_* = skjærhastighet [m/s]

(Norem, 2004)

Skjærhastighet er en hjelpestørrelse. Dette hastighetsbegrepet er definert som:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_s}} \quad (2-3)$$

der

- τ_0 = skjærspenning ved bunnen [Pa]
- ρ_s = partiklernes tetthet [kg/m³]

Kritisk skjærspenning ($\tau_0 = \tau_c$) er den skjærspenning som så vidt setter bunnmateriale i bevegelse. Når strømmen overgår den kritiske skjærspenningen, vil vi få bevegelse av partikler og mulighet for erosjon i skråningen.

Kanalstrømning er per definisjon frispelstrømning og finnes i naturlige elver og kunstige kanaler samt delvis fylte rør.

For å beregne vannføring til en vannstrøm i en kanal anvendes Mannings formel. Formelen forutsetter normalstrømning. Vannføringen er da gitt ved:

$$Q = M \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

der

- M = Mannings tall [m^{1/3}/s]
- R = hydraulisk radius = A/P [m]
- A = areal [m²]

P = våt omkrets [m]
I = skråningshelningen

Gjennomsnittlig vannhastighet kan da regnes ut som:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2-5)$$

Mannings tall er en verdi som beskriver ruheten på overflaten. Ruheten indikerer hvor mye materialet motstår seg strømning. Stor ruhet gir lavt Mannings tall mens lavere ruhet gir høyt Mannings tall. En oversikt over typiske verdier er vist i Tabell 2-1. I utlandet brukes det inverse tallet $n = \frac{1}{M}$ og verdier for n er i tabellen regnet om til Mannings tall M.

Tabell 2-1 Oversikt over typiske verdier for Mannings tall (Crowe m.fl., 2001)

Material	<i>n</i>	<i>M</i>
Betongkledning	0,011-0,016	62,5-91
Asfaltert dekke	0,013-0,016	62,5-77
Jord uten vegetasjon	0,030	33
Jord med lett vegetasjon	0,023-0,026	38,5-43,5
Jord med kraftig vegetasjon	0,035-0,080	12,5-28,5
Jevn steinkledning	0,030	33
Grov steinkledning	0,045	22
Grus og småstein	0,025-0,040	25-40

2.1.2 Vannstandssprang

Når en vannstrøm går over fra overkritisk til underkritisk strømning skjer dette alltid med et vannstandssprang og tilhørende tap av energi. For å vurdere overgangen mellom disse to strømningssformene brukes Froudes tall. Froude tallet er en dimensjonsløs størrelse som uttrykker forholdet mellom treghets- og tyngdekraftene. For en flat kanal er det definert som:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2-6)$$

der

v = hastighet [m/s]
g = tyngdeakselerasjon [m/s²]
h = vanndybde [m]

Når Froude tallet er lik 1 er strømmingen kritisk og det er likevekt mellom treghets- og tyngdekraftene. For Froude tall over 1 er strømmingen overkritisk og tyngdekraften er dominerende. Når Froude tallet er under 1 er det underkritisk strømning og treghetskraftene dominerer. En overkritisk strømning er karakterisert ved høye hastigheter og lave vanndybder, mens lave hastigheter og høy vanndybde karakteriserer underkritisk strømning. (Crowe m.fl., 2001)

Ved overgang fra overkritisk til underkritisk strømning stiger vannspeilet i strømrøret inntil helningen blir for bratt til å være stabil. Dermed blir det dannet et lokalt vannstandssprang med sterk turbulens og stort energitap. Denne situasjonen er illustrert i Figur 2-3. Vannstandssprang kommer ofte av kanalforandringer, endring av bunnhelning eller kanalbredden. En annen mulighet er å framprovosere vannstandssprang på et bestemt sted ved hjelp av klosser eller andre innretninger på bunnen. (Crowe m.fl., 2001)



Figur 2-3 Skisse av et vannstandssprang

I modellforsøkene, som er behandlet i kapittel 4, er bremseklosser blitt plassert nederst i en nedførringsrenne for å provosere fram et vannstandssprang. Vannstandsspranget er vist i Figur 2-4. Dette vannstandsspranget senket energien til vannet og førte til en raskere avsetning av masse.



Figur 2-4 Framprovosert vannstandssprang ved bruk av bremseklosser

2.2 Erosjonskriterier

Erosjon er en betegnelse på den stadige bortsliting og nedbryting av jordoverflaten, både fast fjell og avleirede løsmasser. Hovedårsaken til erosjon i skrånninger er rennende vann og at skrånningen ikke tåler de påkjenningene som oppstår. Vannets krefter påvirker bunnen og enkeltpartikler og fører til at partikler brytes løs og transporteres til nye avleiringssteder.

Forutsetning for å få erosjon er at man får et nettotap av masser i skrånningen. I tillegg må strømkreftene være store nok til å bevege bunnmaterialet.

2.2.1 Erosjonsskader

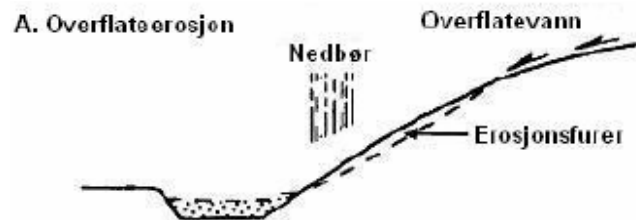
Med skråningsskader i jord forstår man skader som skyldes ustabilitet i de øvre sjikt i grunnen. Disse skråningsskadene kan deles inn i tre hovedtyper:

- overflateerosjon
- grunnvannserosjon
- overflateglidning

(SVV, 1994)

Overflateerosjon:

Overflateerosjon er en skade som skyldes masseforflytning nedover skråninger. Dette skjer ved at mineralkorn eller jordklumper rives løs og transporteres med rennende vann til bunnen av skråningen som vist i Figur 2-5.

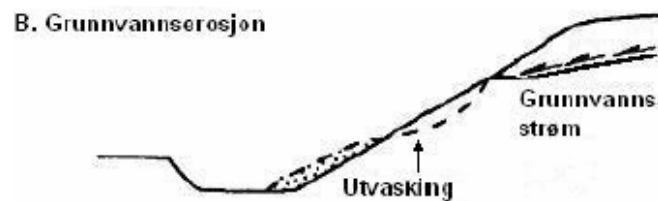


Figur 2-5 Overflateerosjon (SVV, 2005)

Skadeårsaken er dermed overflatevann og nedbør som strømmer over en ubeskyttet jordflate og frakter med seg masser ned i skråningene. Denne løsrivelsen og transportprosessen kalles erosjon. Erosjon kan skje som et tynt sjikt i overflaten eller utvikles til dypere riller eller grøfter. Den sistnevnte skadetypen kan skje når skråningen er lang og/eller vann kommer til fra ovenforliggende områder. Mest utsatt for erosjon er ikke-kohesive, finkornige jordarter. (SVV, 1994)

Grunnvannserosjon:

Grunnvannserosjon kan oppstå når grunnvannet kommer fram i en vegskråning som vist i Figur 2-6.



Figur 2-6 Grunnvannserosjon (SVV, 2005)

Årsaken til at det oppstår konsentrert frambrudd av vann, er som regel at lagdelt grunn blir gjennomskåret. Grunnvannet føres da i vannførende sjikt ut i skråningen. I tillegg kan grunnvannsstrøm framtre i foten av skråningen. (SVV, 1994)

Konsentrert frambrudd av grunnvann kan føre til utvasking i skråning og fot. Særlig i siltjordarter vil vannet kunne rive med seg materialer og føre til en bakovergrepene utvasking. (SVV, 1994)

Overflateglidning:

Overflateglidning er glidning i et sjikt omtrent parallelt med skråningens overflate. Dette illustreres i Figur 2-7.



Figur 2-7 Overflateglidning (SVV, 2005)

Overflateglidninger forekommer i leirige materialer når disse blir oppbløtt ved for eksempel kraftig nedbør. Glidninger vil også lett oppstå i teleløsningen ved at det øverste jordlaget tiner og får et overskudd av vann som hindres i å sige ned i jorda på grunn av dypereliggende tele. Skadeårsaken er ned-satt fasthet i sjikt parallelt med skråningen. (SVV, 1994)

2.2.2 Årsaker til at erosjon oppstår

Det er ulike strømmingssituasjoner som initierer erosjon. Erosjon kan oppstå som følge av:

- overførte skjærspenninger langs overflaten på skråningen
- konsentrert frambrudd av grunnvann i skråningen som følge av lagdelt jord
- frambrudd av grunnvann i skjæringsfot som følge av konsentrasjon av strømlinjer

Det første tilfellet beskriver en situasjon som kan forårsake overflateerosjon. Når vann strømmer som overflatevann vil strømmingen medføre skjærspenninger på underlaget. Når disse overførte skjærspenningen overgår den kritiske skjærspenningen vil partikler rives løs og fraktes med vannet. Se kapittel 2.1.1. Det er denne situasjonen som ligger til grunn for modellforsøket som er gjennomført og som omtales senere i oppgaven.

De neste tilfellene er forårsaket av frambrudd av grunnvann i en skråning. Slike frambrudd vil kunne medføre grunnvannserosjon. Grunnvann kan bli ført ut i selve skjæringskråningen i vannførende lag eller bli presset ut i skjæringsfoten som følge av konsentrasjon av strømlinjer. Grunnen til at erosjon kan oppstå ved frambrudd av grunnvann er gradienter som gjør at kornene mister "feste". (Amundsen, 2004)

2.2.3 Krefter som virker på bunnpartikler

Vann som strømmer over en bunn med jordpartikler utøver krefter på partikler. Løsmaterialer som sandkorn, stein og blokker vil rives med når de ytre strømkrefter er store nok til å skyve, velte eller løfte dem. Kraftene som motvirker denne påvirkningen fra det strømmende vannet er ulike og avhenger av egenskapene til bunnmaterialet. Disse motvirkende kreftene relaterer seg til partiklenes vekt, friksjon mot bunnen og påvirkning mellom bunnpartiklene som kohesjon og sammenkilinger. (Simons og Sentürk, 1992)

Krefter som motvirker medrivende krefter, avhenger av kornstørrelsen og kornfordelingen. For grove sedimenter, som sand og grus, er de motvirkende kreftene hovedsakelig vekten av partiklene. For fine-re sedimenter, som inneholder vesentlige fraksjoner av silt og leire, tenderer disse til å bli kohesive og det er dette som forårsaker motstand mot bevegelse. (ASCE, 1977)

Det er hovedsaklig 3 ulike utøvende krefter fra vannet som påvirker bunnpartikler:

- Dragkraft
- Løftkraft
- Skjærkraft

(NVE 1998)

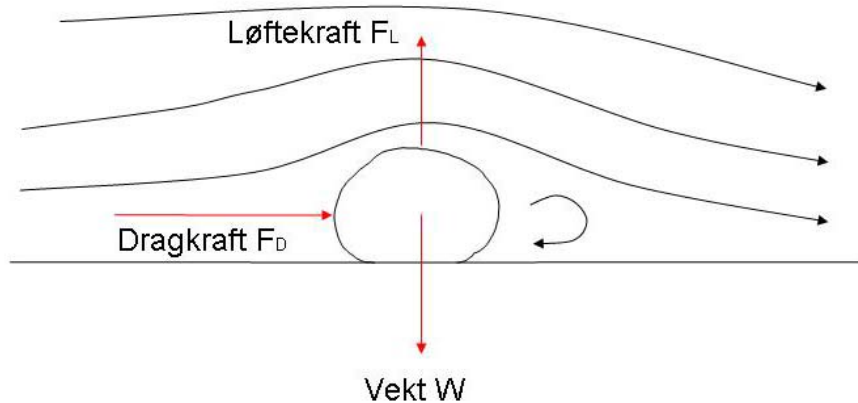
I tillegg vil det være krefter som kommer fra selve bunnpartikkelen. Her kan nevnes:

- Tyngdekraft
- Normalkraft
- Friksjonskraft

Drag og løftkreftene motvirkes av stabiliserende krefter, kornets vekt, samt friksjons- og normalkrefter som virker mellom kornene. Disse stabiliserende kreftene er proporsjonale med resultatanten til tyngde- og forflytningskraften (Cederwall og Larsen, 1976)

Drag- og løftekraft:

Dragkraften (F_D) utgjør den horisontale resultantkomponenten til alle de krefter som virker på kornet. Kraften virker horisontalt i strømretningen som vist i Figur 2-8.



Figur 2-8 Drag- og løftekraft (NVE, 1998)

Dragkraften indikerer vannets trykk og sug parallelt med bunnen på den delen av materialet som stikker opp over resten av bunnen og er gitt ved:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2-7)$$

Løftekraften (F_L) er en vertikal løftekraft som skyldes trykkforskjeller på grunn av lokale hastighetsvariasjoner over kornet. Trykket er mindre enn det hydrostatiske trykket på kornets overside og likeledes det hydrostatiske på dets underside. Løftekraften F_L er gitt ved:

$$F_L = C_L \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2-8)$$

der

A = oppstikkende areal (for F_D) eller horisontalt areal (for F_L) [m^2]

ρ = materialets tetthet [kg/m^3]

v = representativ hastighet foran kornet [m/s]

C_D = dragkoeffisient

C_L = løftekoeffisient

Drag- og løftekoeffisienten varierer ved ulike geometriske former og Reynolds tall.

Likning (2-7) og (2-8) kan brukes direkte til å beregne strømkrefter mot enkeltpartikler. I praksis er det ikke mulig å analysere enkeltkorn i et naturlig vannløp. Dette henger sammen med at vi ikke har ensartede korn og jevn strøm og helning. For å kunne regne ut gjennomsnittlige bunnforhold blir strømmens skjærspenning, τ_0 , brukt. Henholdsvis dragkraft og løftekraft på et korn kan da skrives:

$$F_D = \tau_0 \cdot d^2 \cdot k_1 \quad (2-9)$$

$$F_L = \tau_0 \cdot d^2 \cdot k_2 \quad (2-10)$$

der

d = kornets diameter [m]

k_1, k_2 = konstanter bestemt av kornformen

(NVE, 1998)

Tyngde-, normal- og friksjonskraft:

For å kunne uttrykke likevekt av det totale kraftbildet som virker på en bunnpartikkel, inkluderes kornets tyngde. Det antas foreløpig at kornet har en kuleform. Vekten av en kule blir da:

$$W = \pi \cdot \frac{d^3}{6} \cdot \rho_s \cdot g = d^3 \cdot \rho_s \cdot g \cdot k \quad (2-11)$$

Konstanten k innføres for å generalisere kornets form.

Nettovekten, det vil si vekt fratrukket oppdrift, av et korn kan skrives som:

$$W_n = (\rho_s - \rho_v) \cdot g \cdot d^3 \cdot k \quad (2-12)$$

der

ρ_s = partiklenes tetthet [kg/m³]

ρ_v = tettheten til vann [kg/m³]

k = konstant bestemt av kornformen

Friksjonskraften er en kontaktkraft mellom kornet og overflaten av skråningsbunn. Friksjonskraften er gitt av en friksjonsvinkel, φ . Friksjonsvinkelen angir den vinkelen som får materialet til å bevege seg, $\tan \varphi$ angir da motstanden mot enhver form for bevegelse, glidende, rullende og hoppende. Grense for bevegelse i horisontalretningen kan da finnes ved å ta likevekt av legemet i Figur 2-8.

$$F_D = F_F = (W_n - F_L) \cdot \tan \varphi \quad (2-13)$$

(NVE, 1998)

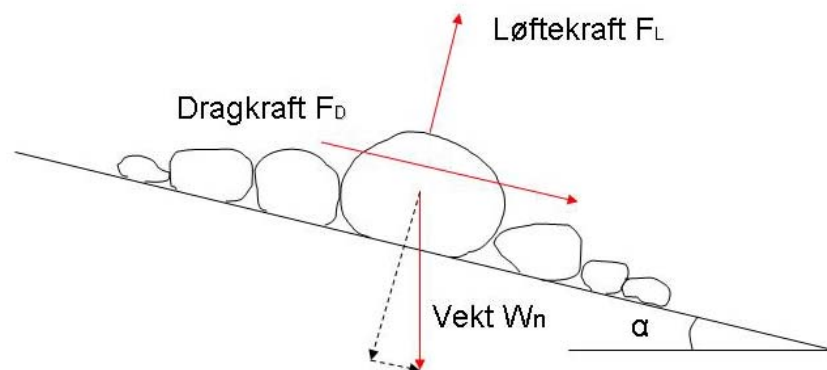
La oss nå gå fra et horisontalt tilfelle over til hvordan situasjonen vil være i en skråning. Likevekt av et legeme i en skråning med helning α , vist i Figur 2-9, vil gi oss et uttrykk for den dragkraften som skal til for å få et legeme ut av likevekt:

$$F_D = (W_n \cdot \cos \alpha - F_L) \cdot \tan \varphi - W_n \cdot \sin \alpha \quad (2-14)$$

der

$W_n \cdot \cos \alpha - F_L$ er normalkraften som virker på underlaget fra partikkelen.

(NVE, 1998)



Figur 2-9 Likevekt av partikkel i skråning utsatt for overflatestrømming

Skjærkraft:

Skjærkraft påvirker bunnen som flate, uten å se på enkeltpartikler, og brukes for å karakterisere de gjennomsnittlige forholdene for bunnen. Dette gir opphav til Shields tall som vi skal gå nærmere inn på i neste kapittel.

Når skjærspenningen langs bunnen oppnår eller overskrider en kritisk skjærspenning vil partiklene settes i bevegelse. (Simons og Sentürk, 1992)

Skjærspenning mellom bunnen og det strømmende vannet er gitt av:

$$\tau_0 = \rho_v \cdot g \cdot R \cdot \sin \alpha \quad (2-15)$$

der

$$\begin{aligned} \rho_v &= \text{tettheten til vann [kg/m}^3\text{]} \\ g &= \text{tyngdeakselerasjon [m/s}^2\text{]} \\ R &= A/P \text{ hydraulisk radius [m]} \\ \alpha &= \text{skråningens helning} \end{aligned}$$

Dette gjelder for normalstrømning, det vil si det antas at strømningstverrsnittet er uforandret i strømretningen (dybde og bredde er konstant). Hastigheten er da lik for alle punkter langs en strømlinje. Normalstrømning kan som oftest antas i en lang, rett skråning og kanal. (NVE, 1998)

2.2.4 Grense for bevegelse av bunnpartikler

For å finne kritiske grenser for kornstørrelse og strømningshastigheter er det utviklet to ulike diagram. Disse vil bli kort omtalt nedenfor.

Shields diagram:

Shields diagram for bevegelse av bunnpartikler har tatt utgangspunkt i kritisk skjærspenning for å finne den kraft som må til for å bevege bunnpartiklene. Diagrammet er basert på forsøk med ensgraderte masser. For varierte kornstørrelser har det vist seg at $d = d_{60}$, det vil si at 60 % av massen etter vekt er finere enn d_{60} , gir tilnærmet samsvar med de ensgraderte massene. d_{60} har en viss usikkerhetsmargin og for å ta hensyn til dette er det blitt vanlig å bruke d_{50} som kornstørrelsesverdi. Shields diagram illustrerer forholdet mellom Shields tall, C_s , for kritisk bunntilstand og Reynolds tall, Re , i grenselaget. Diagrammet er vist i Figur 2-10.

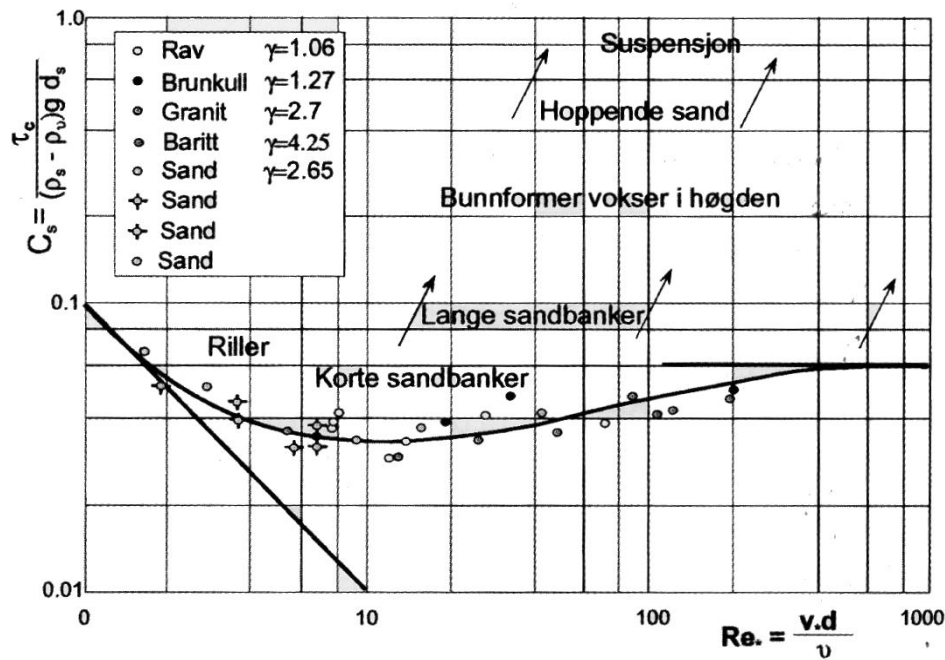
Shields tall for kritisk bunntilstand er gitt i ligning (2-16) og fremkommer ved å sammenkoble ligningene gitt i kapittel 2.2.3. Alle konstanter samt $\tan \phi$ samles i en faktor kalt Shields tall:

$$C_s = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_f) \cdot d_s \cdot g} \quad (2-16)$$

der

$$\begin{aligned} \tau_c &= \text{kritisk skjærspenning [Pa]} \\ \rho_s &= \text{partiklenes tetthet [kg/m}^3\text{]} \\ \rho_f &= \text{væskens tetthet [kg/m}^3\text{]} \\ g &= \text{tyngdens akselerasjon [m/s}^2\text{]} \\ d_s &= \text{partikkelstørrelse [m]} \end{aligned}$$

Shields tall er en dimensjonsløs størrelse som varierer med strømningskarakteristikken langs bunnen.



Figur 2-10 Shields diagram (NVE, 1998)

Shields diagram vist i Figur 2-10 viser at Shields tall, C_s , varierer innenfor grensene 0,03 og 0,1 avhengig av hvordan Reynolds tall, Re , varierer. Når helningen på skråningen øker, øker Re og følgelig C_s . Shields diagram viser at for strømming med Reynolds tall større enn 600 er $C_s = 0,06$.

Kritisk skjærspenning angir den skjærspenning som må til for så vidt å sette bunnmaterialet i bevegelse. Den kritiske skjærspenningen fremkommer av ligning (2-16).

$$\tau_c = C_s \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot d_s$$

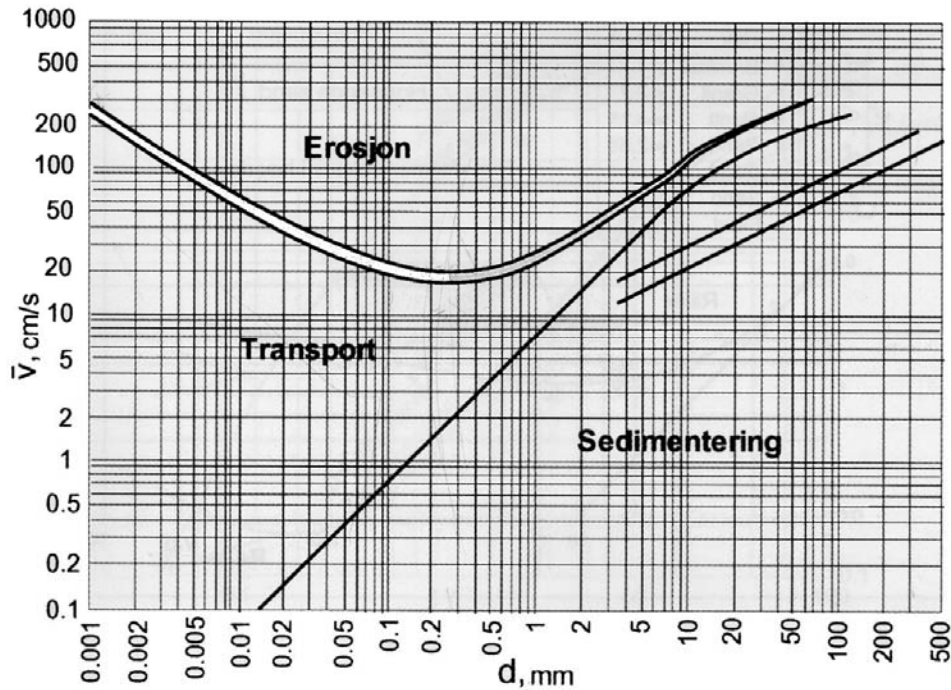
Sammenstiller vi denne ligningen med skjærhastighet definert i kapittel 2.1.1 får vi et uttrykk for kritisk skjærhastighet gitt som:

$$v_*^k = \sqrt{C_s \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} \cdot g \cdot d_s} \quad (2-17)$$

Når den kritiske skjærhastigheten blir overskredet vil det bli bevegelse i bunnpartiklene.

Hjulstrøms diagram:

Hjulstrøms diagram tar utgangspunkt i gjennomsnittshastigheten i vannstrømmen for å finne grensen for bevegelse av bunnpartikler. Diagrammet er vist i Figur 2-11. Hjulstrøms resultater er basert på forsøk med relativt ensgradert material og relativt konstant vanddybde. Det er verdt å merke seg at gjennomsnittshastigheten ikke er en entydig parameter i og med at hastighetsfordelingen er avhengig av blant annet tverrsnittsform og vanddybde.



Figur 2-11 Hjulstrøms diagram (NVE, 1998)

Diagrammet er meget illustrerende idet vi klart ser i hvilke områder vi kan vente henholdsvis vedvarende erosjon, relativt konstant sedimenttransport og avleiring av masse. Området på figuren som skiller erosjon og sedimenttransport representerer begynnelsen av erosjon. Vi ser at når kornstørrelsen kommer ned i siltområdet ($d < 0,06$ mm) øker grensehastigheten grunnet kohesive krefter. (NVE, 1998)

2.3 Massetransport

Når overflatevannet strømmer langs en fast bunn skjer det en påvirkning og et komplisert kraftspill mellom strømmen og bunnen. Dette gjelder spesielt når strømmingen er turbulent og materialet settes i bevegelse og eroderes. Når erosjonsprosessen starter skjer transporten av det eroderende materialet først som en transport av partikler som ruller og haser langs bunnen (bunntransport). Ettersom vannhastigheten øker begynner disse kornene å hoppe og kan ved nedslag initiere transport av ytterligere partikler. Ved høyere hastighet går turbulensen i vannet over til å bare frakte eroderte partikler og en transport av suspendert, oppslammet material opprettholdes (Cederwall og Larsen, 1976).

Det er vanlig å dele inn materialtransport i tre ulike former:

- Ingen transport har vi når alle partikler i bunn er i ro
- Bunntransport opptrer når bevegelsen til sedimenter har hyppig kontakt med bunnen
- Suspendert transport skjer når sedimenter blir fraktet i væsken uten bunnkontakt

(NVE, 1998)

Overgangen mellom disse ulike transportformene er vag. Det henger sammen med at strømming er turbulent av natur. Ved kraftig erosjon er det vanskelig å skille mellom den bunntransporterende fasen og transporten i suspendert form, ettersom materialinnholdet er høyt nær bunn. (Cederwall og Larsen, 1976) Generelt sier man at overgangen til suspendert form skjer når skjærhastigheten er større enn fallhastigheten. (NVE, 1998).

Oppgaven skal videre se på bunnlast, fordi det er disse partiklene som skaper størst vansker i forbindelse med avsetning i dreneringssystem. I tillegg påfører det vegholder kostnader i form av vedlikehold av dreneringssystem og fjerning av masser.

2.3.1 Karakteristisk ved bunnløst

Bunnløst er karakterisert som den del av sedimentbevegelsen som foregår med hyppig bunnløstkontakt. Transporten foregår med rullende, hoppende og glidende bevegelser i nærheten av bunnløstlaget. (Cederwall og Larsen, 1976) Denne sedimentbevegelsen holdes i gang dels ved vannets friksjon mot det enkelte korn, dels på grunn av hydrodynamiske trykkforskjeller som følge av at vannhastigheten øker med avstand fra bunnen, og dels av samme typen turbulensvirvler som gjør at partikler holdes suspendert høyere oppe i vannstrømmen (NVE 1998)

Ikke kohesive bunnløstpartikler vil starte å bevege seg så snart skjærkraften på bunnløstmaterialet overgår den kritiske skjærkraften. Generelt vil silt og leir partikler bli suspendert, mens sand og gruspartikler vil transporteres langs bunnen.

2.3.2 Partikkelstørrelse

Sedimentpartikler kan klassifiseres i seks hovedgrupper avhengig av kornstørrelsen. Dette er vist i Tabell 2-2.

Tabell 2-2 Oversikt over kornstørrelser (Emdal, 1999)

Beskrivelse	Dimensjoner i mm
Blokk	> 600
Stein	60-600
Grus	2-60
Sand	0,06-2
Silt	0,002-0,06
Leir	< 0,002

Ikke kohesive jordarter som sand vil lett graves vekk ved strømmens påvirkning. Kohesive jordarter som leire har stor motstandskraft mot erosjon.

Sedimenter er sammensatte og består av korn med ulike størrelser. Ut fra partikkelstørrelsen får vi grunnlaget for de ulike typer transport. Bunnløsttransport er karakteristisk for stein, grus og sand. Stein og grus spiller i tillegg en stor rolle ved evaluering av lokal erosjon og motstand mot strømning. Silt og leir fraksjonen er av betydelig interesse ved evaluering av den totale sedimenttransporten og da spesielt den suspenderte lasten. (Simons og Sentürk, 1992)

Det kan etableres formel for kritisk kornstørrelse. Shields' tall, ligning (2-16) er gitt som:

$$C_s = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_v) \cdot d_s \cdot g}$$

og skjærspenning for stasjonær strøm gitt i ligning (2-15). Antar relativt små α og kan dermed sette $\sin\alpha \approx I$. Skjærspenning er da gitt som:

$$\tau = g \cdot \rho_f \cdot R \cdot I$$

Setter vi uttrykket for skjærspenning inn i ligning (2-16) og løser ut med hensyn på kornstørrelsen får vi et uttrykk for kritisk kornstørrelse ved jevn helning og dybde:

$$d_c = \frac{\rho_f \cdot R \cdot I}{(\rho_s - \rho_v) \cdot C_s} \quad (2-18)$$

Har vi kornstørrelser større enn denne kritiske verdien vil skråningsoverflaten være stabil med hensyn på erosjon.

2.3.3 Formelverk for bunnlast

Mekanikken rundt bunntransport er komplisert og har ført til et stort antall formler for beregning av bunnlast. Vi skal her gå gjennom to ulike formler for bunnlast.

Meyer-Peters formel for bunnlast:

Meyer-Peters formel for bunnlast er gitt av:

$$g_b = \Phi \cdot \omega \cdot \rho_s \cdot d \quad (2-19)$$

der

$$\Phi = \left(\frac{4}{\Psi} - 0,188 \right)^{3/2}$$

$$\Psi = \frac{(\rho_s - \rho_v) \cdot g \cdot d}{\tau_0}$$

g_b = bunnlast målt som vekt pr enhet av tid og bredde [N/m·s]

ω = fallhastighet [m/s]

τ_0 = skjærspenning langs bunnen [Pa]

ρ_s = partiklenes tetthet [kg/m³]

ρ_v = vannets tetthet [kg/m³]

d = partikkelstørrelse [m]

Formelen forutsetter at hastigheten ligger over den kritiske hastigheten. I tillegg forutsettes det fri tilgang på sedimenter og forholdsvis ensartet bunn, samtidig som massetransporten foregår i uendelig utstrekning.

Meyer-Peters bunnlastformel angir dermed maksimal transportevne og representerer dermed potensialet til en vannstrøm.

Et eksempel på beregning av bunnlast etter Peter-Meyers formel er gitt i Tabell 2-3. De ulike verdiene som er valgt er tatt fra modellforsøket og vil bli beskrevet nærmere i kapittel 3.

Tabell 2-3 Utregning av bunnlast etter Peter-Meyers formel

Fysiske størrelser	Symbol	Benevnning	Verdi
Partiklenes tetthet	ρ_s	[kg/m ³]	2650
Vannets tetthet	ρ_v	[kg/m ³]	1000
Helning på renne	I	[°]	14
Vannhøyde	h	[m]	0,022
Bredde av renne	b	[m]	0,2
Areal	$A=h \cdot b$	[m ²]	0,0044
Våt omkrets	$P=2h \cdot b$	[m]	0,244
Hydraulisk radius	$R=A/P$	[m]	0,018
Skjærspenning langs bunnen	$\tau_0 = \rho_v \cdot g \cdot R \cdot \sin \alpha$	[Pa]	52,344
Partikkeldiameter	d	[m]	0,01
Hjelpestørrelse	$\Psi = \frac{(\rho_s - \rho_v) \cdot g \cdot d}{\tau_0}$		3,092
Hjelpestørrelse	$\Phi = \left(\frac{4}{\Psi} - 0,188 \right)^{3/2}$		1,2
Fallhastighet	ω	[m/s]	0,657
Bunnlast	$g_b = \Phi \cdot \omega \cdot \rho_s \cdot d$	[N/m·s]	20,24

En bunnlast på 20,24 N/m·s tilsvarer 0,42 kg/s fordelt på bredden av rennen.

Shields formel for bunnlast:

Shields formel for bunnlast er gitt ved:

$$g_b = 10 \cdot q \cdot I \cdot \frac{\tau_0 - \tau_c}{(s-1)^2 \cdot d_{50}} \quad (2-20)$$

der

g_b = bunnlast målt som vekt pr enhet av tid og bredde [kg/m·s]

q = vannføring pr enhetsbredde [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$]

I = bunnhelning

s = spesifikk vekt av partikler = γ_s/γ_v

γ_v = romvekt av vann [kN/m^3]

γ_s = romvekt av partikler [kN/m^3]

d_{50} = midlere kornstørrelse [m]

τ_0 = faktisk skjærspenning ved bunnen [Pa]

τ_c = kritisk skjærspenning [Pa]

Det forutsettes her en nedre kritisk grense for transport, τ_c . I tillegg forutsettes det, som for Meyer-Peters bunnlastformel:

- rikelig tilgang til sedimenter og bunn som består av samme type sedimenter som det som transporteres
- massetransporten kan foregå over et uendelig langt strekke

Dermed angir Shields formel den maksimale transportevne til en vannstrøm.

2.4 Sedimentasjon

Sedimentasjon omfatter prosessene rundt erosjon, transport og avleiring av sedimenter. Sedimenter er transportert i suspensjon, som bunnlast eller som en blanding mellom disse to transportformene. (ASCE, 1977)

Avsetting av sedimenter kan føre til problemer for veg- og dreneringssystem. Material som blir løsrevet under erosjon kan enten bli avsatt umiddelbart eller fraktet med strømmen i lengre distanser. Problemet oppstår når sedimentene avsettes i dreneringssystemet og hindrer effektiv vannføring her. I noen tilfeller kan massene avsettes på vegen og redusere trafikkavviklingen her. Spesielt i situasjoner med høy vannføring, vil strømmen kunne løsrive større masser som også blir fraktet lenger. (ASCE, 1977)

De egenskapene som har mest betydning for sedimentering er:

- sedimentpartikkelens størrelse og form
- fallhastigheten

(ASCE, 1977)

Disse to egenskaper virker inn på sedimentasjonslengden, som er den nødvendige strekningen for avsetting av sedimenter. Det er viktig å vite hvor hurtig sedimenter avsettes for å vite hvilke tiltak som kan forhindre at partikler når fram til veg- og dreneringssystem og gjør skade her.

For å finne sedimenteringslengden er begrepet fallhastighet en viktig parameter. I de to påfølgende kapitlene blir fallhastigheten introdusert og videre brukt i uttrykket for sedimenteringslengde.

2.4.1 Fallhastighet

Fallhastighet, ω , blir brukt til å estimere motstand mot strømming og transportkapasiteten. Den er definert som den hastigheten en enkelt partikkel som faller vertikalt i stillestående, destillert vann med uendelig utstrekning har. Denne synkehastigheten har betydning for transport og avleiring og for hvordan svevende partikler fordeler seg i vannstrømmen. I praksis faller ikke en partikkel alene og vannet er avgrenset, men formelverket gir en tilnærming til virkeligheten. (Simons og Sentürk, 1992).

Fallhastigheten til en partikkel er gitt ved Stoke's lov. Teoretisk sett følger sedimentasjonen Stoke's lov. Den angir hvor fort partikler faller og avsettes gitt at det er væske på alle sider av partikkelen. (Simons og Sentürk, 1992)

$$\omega = \frac{1}{18} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\nu} \right) \cdot g \cdot d^2 \quad (2-21)$$

der

ρ_s = tettheten til partikkel [kg/m^3]

ρ_f = tettheten til væskemediet som omgir partikkel [kg/m^3]

ν = viskositeten til væskemediet [m^2/s]

g = tyngdeakselerasjon [m/s^2]

d = diameteren til partikkel [m]

Fallhastigheten er en viktig parameter for å forstå sedimentbevegelse. Turbulensen i strømmen tenderer å løsrive og løfte bunnpartiklene, mens dragkraften motvirker disse bevegelsene.

Dragkraften er gitt i ligning (2-7) som:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

Nettotyngden til en kulepartikkel vil være gitt ved:

$$D = \Delta\rho \cdot g \cdot V_{kule} \quad (2-22)$$

der

$$\Delta\rho = (\rho_{kule} - \rho_v)$$

Hvis vi bytter ut v^2 med fallhastigheten ω^2 , setter inn for dragkraft, F_D , og areal for kule kan fallhastigheten skrives som:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot D}{C_D \cdot \rho \cdot A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3}{C_D \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho \cdot C_D}} \quad (2-23)$$

der

$$\Delta\rho = \rho_s - \rho_v$$

ρ_s = tettheten til partiklene [kg/m^3]

ρ_v = tettheten til vann [kg/m^3]

g = tyngdeakselerasjon [m/s^2]

d = partikkelens diameter [m]

C_D = dragkoeffisienten

Sedimentmasser er sammensatt av korn som varierer i størrelse og form. For å fange opp dette kan en median størrelse $d = d_{50}$ brukes. Det vil si den partikkelstørrelsen der 50 % av materialet har partikler finere eller grovere enn partikkelen i en kornfordelingskurve.

Som grunnlag for modellforsøkene, som skal gjennomgås i de neste kapitlene, har en valgt en steinstørrelse på 0,2 m og 0,4 m som representativt for hva som opptrer av massetransport under større flomvannføringer. For å illustrere hvor langt en kan forvente at partikler avsettes ved bruk av de to ulike partikkelstørrelsene skal sedimentasjonslengden beregnes. Første trinn er å finne fallhastigheten til de ulike partikkeldiametrene. For å finne fallhastigheten, ω , for de ulike partikkelstørrelsene må dragkoeffisienten C_D fastsettes. Denne dragkoeffisienten er avhengig av Reynoldstallet, som igjen varierer med hastighet, partikkelstørrelse og den kinematiske viskositeten. For kuler generelt kan de ulike dragkoeffisientene avleses ut fra diagram (Crowe m.fl., 2001). Siden bunnmaterial sjelden har en perfekt kuleform og dermed mangler de strømningsmekniske egenskapene en kule har er det valgt å fastsette en gjennomsnittlig verdi på dragkoeffisienten. I samarbeid med professor Harald Norem, så er en dragkoeffisient $C_D = 0,5$ valgt i beregningene.

Tabell 2-4 Verdier brukt ved beregning av fallhastighet

Fysiske størrelser	Symbol	Benevnning	Verdi
Dragkoeffisient	C_D	-	0,5
Tettheten til partiklene	ρ_s	[kg/m ³]	2650
Tettheten til vann	ρ_v	[kg/m ³]	1000

Fallhastigheten kan dermed finnes ut fra ligning (2-23):

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho_w \cdot C_D}}$$

Partikkelstørrelse $d = 0,2$ m

For partikkelstørrelse $d = 0,2$ m vil en få en fallhastighet lik 2,94 m/s.

Partikkelstørrelse $d = 0,4$ m

For partikkelstørrelse $d = 0,4$ m vil fallhastigheten være på 4,16 m/s.

I Tabell 2-5 er det illustrert hvordan sedimentasjonshastigheten varierer med partikkelstørrelse ifølge Stoke's lov. Partiklenes tetthet og størrelse bestemmer sedimentasjonshastigheten. Mindre partikler samt partikler med lav tetthet vil ha lavere sedimentasjonshastighet enn større partikler med høyere tetthet. Det viser også utregningen gjort ovenfor. En partikkelstørrelse på $d = 0,2$ m har en lavere fallhastighet enn en partikkelstørrelse på $d = 0,4$ m.

Tabell 2-5 Sedimentasjonshastighet for partikler. Hastighet angitt i m/døgn ved 20°C (SVV, 1998)

Partikler [mm]	Tetthet [g/cm ³]	
	2,0	2,7
Sand		
0,2	470	800
0,05	120	200
Silt		
0,01	4,7	8,0
0,005	1,2	2,0
Leire		
0,002	0,19	0,32
0,001	0,05	0,08

2.4.2 Sedimentasjonslengde

Sedimentasjonslengden angir den lengden det tar før sedimenter avsettes.

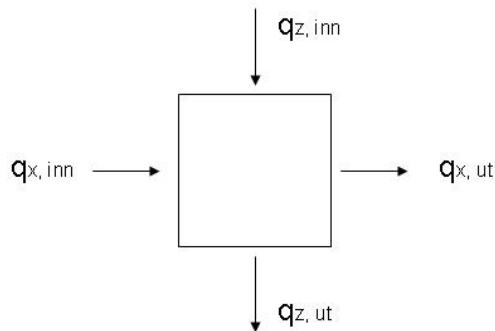
Det kan vises at sedimentkonsentrasjonen, C , vil være gitt av følgende differensialligning:

$$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial \omega C}{\partial z} = 0 \quad (2-24)$$

der

1. leddet angir hastigheten av sedimentkonsentrasjon (C) i x -retning
2. leddet angir fallhastigheten av sedimentkonsentrasjon (C) i z -retning

Differensialligningen fremkommer ved å betrakte et kontrollvolum der kontinuitetsligningen er gjeldende.



Figur 2-12 Prinsipp for kontinuitet

Sedimentasjon skjer når masser avsatt er større enn massene som kommer inn i z -retning. For at kontinuitet skal være oppfylt må dette balanseres ved at mengde material som går ut av kontrollvolumet, vist i Figur 2-12, i x -retning, er mindre enn den mengden som kommer inn. Vi får da avsatt masse.

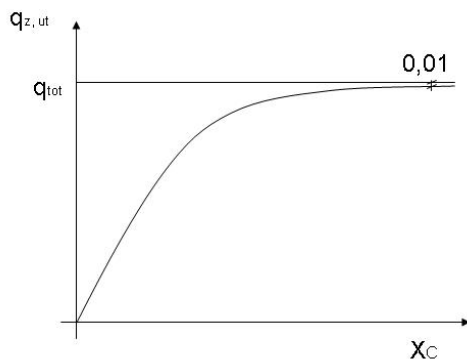
I prinsippet vil 99 % av materialet bli felt ut uten resuspensering ved en distanse, som illustrert i Figur 2-13. Denne distansen er gitt ved:

$$X_C = 4,6 \cdot \frac{h \cdot v}{\omega} \quad (2-25)$$

der

- h = vannhøyden [m]
- v = vannhastigheten [m/s]
- ω = fallhastigheten [m/s]

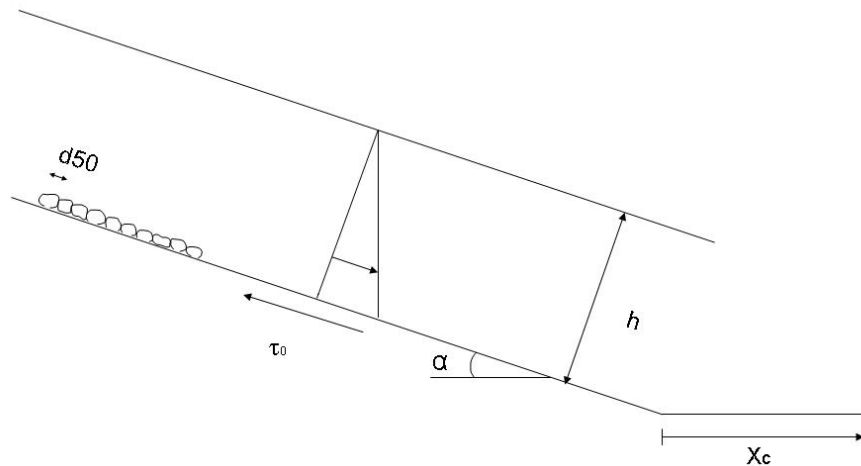
(Julienne, 1998)



Figur 2-13 Sedimentasjonslengde

Som ligning (2-25) uttrykker vil stor fallhastighet gi en kort sedimentasjonslengde. I tillegg vil de fleste partiklene felles ut relativt fort som Figur 2-13 viser.

I kapittel 2.4.1 ble fallhastigheten beregnet for to ulike partikkeldiametre $d = 0,2 \text{ m}$ og $d = 0,4 \text{ m}$. Ved hjelp av ligning (2-25) skal forventet sedimentasjonslengde for de ulike partikkeldiametrene beregnes. Strømningssituasjonen er gitt i Figur 2-14. Verdier brukt ved utregning er gitt i Tabell 2-6. I formelverket er det forutsatt at det er det horisontale strekket, vist i Figur 2-14, som gir grunnlaget for sedimentasjonslengden. I tillegg er det antatt at vannhøyden, h , ved det horisontale strekket er tilnærmet lik vannstanden i nedføringsrennen.



Figur 2-14 Strømningssituasjon

Tabell 2-6 Verdier brukt ved beregning av sedimentasjonslengde

Fysiske størrelser	Symbol	Benevning	Verdi	
Mannings tall	M	$[\text{m}^{1/3}/\text{s}]$	30	
Vannhøyde	h	$[\text{m}]$	0,044	
Helning på bekkeløp	I	-	1:4	
Bredde av bekkeløp	b	$[\text{m}]$	4	
Areal	$A=h*b$	$[\text{m}^2]$	1,76	
Våt omkrets	$P=2h*b$	$[\text{m}]$	4,88	
Hydraulisk radius	$R=A/P$	$[\text{m}]$	0,3607	
Vannhastighet	$v = M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$	$[\text{m/s}]$	7,60	
Fallhastighet	$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho \cdot C_D}}$	$[\text{m/s}]$	$d = 0,2 \text{ m}$ 2,94	$d = 0,4 \text{ m}$ 4,16

Partikkelstørrelse $d = 0,2 \text{ m}$

For partikkelstørrelse $d = 0,2 \text{ m}$ vil en få en forventet sedimentasjonslengde lik 5,24 m. Det vil si at 99 % av partiklene vil være utfelt i løpet av 5,24 m.

Partikkelstørrelse $d = 0,4 \text{ m}$

For partikkelstørrelse $d = 0,4 \text{ m}$ vil forventet sedimentasjonslengde være på 3,70 m.

Som forventet vil sedimentasjonslengden være kortere ved høyere fallhastighet. Sedimentasjonslengden kan være rettleidende ved valg av bredde på grøft eller lengde på et sedimentasjonsbasseng. For eksempel vil en for partikkelstørrelse $d = 0,2 \text{ m}$ ha en sedimentasjonslengde på 5,24 m fra skråningsfot og horisontalt ut. Dermed må et aktuelt sedimentasjonsbasseng være større enn denne sedimentasjonslengden for å fange opp materialene før de når veg- og dreneringssystemet.

3 Modellforsøk

For å få en bedre forståelse av hvordan man kan unngå at transport av masser kan føre til gjentetting av stikkrenner, er det utført modellforsøk. Modellforsøket tar for seg bunnlaster, fordi det er disse partiklene som skaper størst vansker i forbindelse med avsetning i dreneringssystem. Opphopning av material i stikkrenner fører til redusert kapasitet for dreneringssystemet. Blir kapasiteten tilstrekkelig svekket må vannet finne alternative strømningsveger og man mister kontroll over vannet. Dette kan føre til utvasking av fylling og redusert bæreevne av vegkroppen med det resultat at vegen kan miste sin funksjonalitet. Gjennomføringen av modellforsøket er utført i laboratorieskala og er et nyttig verktøy i arbeidet med å komme fram til ulike utforminger for å redusere risikoen for at slike situasjoner oppstår.

Modellforsøket er utført i Vassdragslaboratoriet ved institutt for vann- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Modellen simulerer en flomsituasjon med tilhørende massetransport og gir grunnlag for å vurdere effekten av ulike innløpsutforminger.

3.1 Hensikt

Hensikten med modellforsøkene er å komme fram til bedre planlegging og utforming av innløpsområdet for stikkrenner med hensyn til å forhindre gjentetting av disse. Gjennom modellforsøkene er det ønskelig å utvide kunnskapen og bedre beslutningsgrunnlag for utforming av innløpsområdet. På denne måten kan en redusere sannsynligheten for gjentetting av stikkrenner og omfang av skader.

Modellforsøket skal hjelpe til å få en bedre forståelse for hvordan massetransport påvirker dreneringssystemet. Dette skal gjøres ved å se på hvordan grøftebredde, plassering av stikkrenner og fyllingshøyde har betydning for ansamling av masser. I tillegg skal bremseklosser settes inn for å vurdere effekten av energidreperer.

Målet med modellforsøket blir dermed å finne en optimal løsning som er vedlikeholdsvennlig og kostnadseffektiv, samtidig som den er anvendbar i praksis.

3.2 Modellover

Modellforsøk er ofte en nedskalert etterligning av virkelige forhold i naturen. For at resultater fra modellforsøk skal være mest mulig overensstemmende med de virkelige tilstander som opptrer i naturen må de viktigste fysiske størrelsene i natur og modell oppfylle modellovene.

Skalering av modell mot natur må tilfredsstille de tre typer modellover:

- geometrisk likedannethet
- kinematisk likedannethet
- dynamisk likedannethet

(Norem, 1974)

3.2.1 Geometrisk likedannethet

Geometrisk likedannethet har vi når alle mål i naturen gjengis i samme forhold som modellen. Når alle lengder i modellen er L_r ganger lengden i naturen blir skaleringsnummeret gitt ved:

$$L_r = \frac{L_m}{L_n} \quad (3-1)$$

(Norem, 1974)

I dette modellforsøket vil en målestokk på 1:20 bli brukt og vi har da:

$$L_r = \frac{h_m}{h_n} = \frac{b_m}{b_n} = \frac{d_m}{d_n} = \frac{1}{20} \quad (3-2)$$

der

h = vannhøyde [m]

b = bredde på renne [m]

d = partikkeldiameter [m]

I tillegg vil alle vinkler i modell og natur være like og vi har dermed oppnådd geometrisk likedannethet.

3.2.2 Kinematisk likedannethet

For at kinematisk likedannethet skal være oppfylt må forholdet, v_r , mellom hastigheter i modell og natur, være konstant:

$$v_r = \frac{v_m}{v_n} = \frac{\omega_m}{\omega_n} = \frac{v_{k,m}}{v_{k,n}} \quad (3-3)$$

der

v = vannhastighet [m/s]

ω = fallhastighet [m/s]

v_k = kritisk hastighet [m/s]

(Norem, 1974)

Ut fra beregninger er forholdet mellom vannhastighet i modell og natur gitt som:

$$\frac{v_m}{v_n} = \frac{1}{4,42} \quad (3-4)$$

Fallhastighet er i ligning (2-23) gitt som:

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho \cdot C_D}}$$

For turbulent strømning er C_D konstant. Dette vil vi ha både i modell og natur. Forholdet mellom fallhastighet i modell og natur er da beregnet til:

$$\left(\frac{\omega_m}{\omega_n} \right) = \frac{1}{4,47} \quad (3-5)$$

Den kritiske hastigheten er funnet ut fra Hjulstrøms diagram gitt i Figur 2-11. Denne verdien angir den største vannhastigheten som kan opptre før begynnende erosjon og løsrivelse av bunnpartikler starter. Forholdet mellom modell og natur er da gitt som:

$$\left(\frac{v_{k,m}}{v_{k,n}} \right) = \frac{1}{4,47}$$

Dermed har vi at både vannhastighet, kritisk hastighet og fallhastighet opprettholder et tilnærmet likt forhold for hastigheter. Den kinematiske likedannetheten er dermed oppfylt.

$$\frac{v_{k,m}}{v_{k,n}} \approx \frac{v_m}{v_n} \approx \frac{\omega_m}{\omega_n} = \frac{1}{4,47} \quad (3-6)$$

3.2.3 Dynamisk likedannethet

Dynamisk likedannethet krever at alle typer krefter i natur og modell er skalert i samme forhold. De viktigste kreftene som virker mot bunn og mellom væske og partikler er:

- Friksjonskraft
- Gravitasjonskraft

Trehetskraften angir den fiktive kraften som skal til for å balansere systemet i dynamisk likevekt. Trehetskraften er gitt som:

$$K = m \cdot a \quad (3-7)$$

der

m = masse [kg]

a = akselerasjon [m/s^2]

Relasjonen mellom de ulike kreftene kan da skrives som:

$$\rho \cdot d^3 \cdot \frac{dv}{dt} = \rho \cdot d^3 \cdot g + C_D \cdot \mu \cdot v \cdot d \quad (3-8)$$

der

1. leddet $\rho \cdot d^3 \cdot \frac{dv}{dt}$ angir trehetskraften

2. leddet $\rho \cdot d^3 \cdot g$ angir gravitasjonskraften

3. leddet $C_D \cdot \mu \cdot v \cdot d$ angir friksjonskraften

ρ = tetthet [kg/m^3]

d = partikkeldiameter [m]

$\frac{dv}{dt}$ = a = akselerasjon [m/s^2]

g = tyngdeakselerasjon [m/s^2]

C_D = dragkoeffisient

μ = dynamisk viskositet [$\text{N}\cdot\text{s/m}^2$]

v = hastighet [m/s]

(Norem, 1974)

I praksis er det sjelden mulig at alle disse kreftene i natur og modell er gjengitt i samme forhold. Derfor velges de kreftene som har mest betydning for forsøket. I de fleste tilfeller med strømning er tyngdekraften mest betydningsfull og Froude tallet vil være hensiktsmessig å bruke. Froude tallet er da angitt som forholdet mellom treghet og gravitasjon:

$$\frac{\rho \cdot d^3 \cdot \frac{dv}{dt}}{\rho \cdot d^3 \cdot g} = \frac{\frac{v}{L}}{g} = \frac{v^2}{L \cdot g} = Fr \quad (3-9)$$

Froude tallet baserer seg på at man har samme tyngdeakselerasjon i modellen som i naturen. For at den dynamiske likedannetheten skal være oppfylt må Froude tallet være tilnærmet likt mellom natur og modell. Froude tallet er gitt i ligning (2-6) som:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$$\left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \right)_m = \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \right)_n$$

$$\frac{v_m}{v_n} = \sqrt{\frac{h_m}{h_n}} = \sqrt{\frac{1}{20}} = \frac{1}{4,47}$$

Forholdet mellom hastighet i modell og natur er dermed gitt som 1:4,5. Alle hastigheter vil dermed oppfylle den geometriske likedannetheten.

3.2.4 Karakteristiske verdier for natur

I samarbeid med professor Harald Norem er det valgt følgende karakteristiske verdier for natur:

Mannings tall:	$M = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Bredde av bekkeløp:	$b = 4 \text{ m}$
Vannhøyde:	$h = 0,44 \text{ m}$
Helning på bekkeløp:	$I = 1:4$
Partikkelstørrelse:	$d = 0,2 \text{ m}$ og $d = 0,4 \text{ m}$

For lav fylling er følgende karakteristiske verdier valgt:

Fyllingshøyde	$h = 3 \text{ m}$
Fyllingshelning	$I = 1:2$
Vegbredde	$b = 8 \text{ m}$
Dimensjon på stikkrenne	$d = 2000 \text{ mm}$ og $d = 1000 \text{ mm}$

Den høye fyllingen er halvert i forhold til den lave fyllingen og vegbredden er dermed ikke en karakteristisk verdi for natur. De karakteristiske verdiene for høy fylling er:

Fyllingshøyde	$h = 5 \text{ m}$
Fyllingshelning	$I = 1:1,2$
Dimensjon på stikkrenne	$d = 2000 \text{ mm}$

3.2.5 Oppfylling av modellovene

For å vite hvordan forholdene utarter seg i natur kan en undersøke dette ved hjelp av modellforsøk som simulerer tilsvarende utforminger i naturen. Det er da viktig at modellovene er oppfylt slik at resultater fremkommet ved modellforsøk er proporsjonale med naturen. De ulike størrelsene som er undersøkt er vist i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Oversikt over verdier for natur og modell

Fysiske størrelser	Symbol	Benevning	Verdi			
			Natur		Modell	
Vannhøyde	h	[m]	0,44		0,022	
Vannhastighet	v	[m/s]	7,60		1,72	
Vannføring	Q	[m ³ /s]	13,4		0,0076	
Partikkeldiameter	d	[m]	0,2 m		0,01	
			0,4 m		0,02	
Fallhastighet	ω	[m/s]	$d = 0,2 \text{ m}$	$d = 0,4 \text{ m}$	$d = 0,01 \text{ m}$	$d = 0,02 \text{ m}$
			2,938	4,155	0,657	0,929
Kritisk hastighet	v_k	[cm/s]	540	850	115	190
Froude tall	Fr	-	4,22		4,27	

Modellovene gir skaleringsforholdet mellom natur og modell. De valgte modellmålestokkene er 1:2 for geometriske størrelser, 1:4,47 for hastigheter og 1:1 for Froudes tall. Ut fra de verdier som er valgt og beregnet for natur og modell får vi det endelige forholdet mellom natur og modell. Oversikt over i hvilken grad modellmålestokken er oppfylt er vist i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Oversikt over i hvilken grad modellmålestokkene er oppfylt

Forhold (Natur/modell)	Symbol	Ønskelig	Endelig modell	Tilfredsstillelse
Vanndybde	h	1:20	1:20	Ok
Froudes tall	Fr	1:1	1:0,99	Ok
Vannhastighet	v	1:4,47	1:4,42	Ok
Fallhastighet	ω	1:4,47	1:4,47	Ok
Kritisk hastighet	v_k	1:4,47	1:4,47	Ok
Partikkelstørrelse	d	1:20	1:20	Ok

Som tabellen viser har de ulike skaleringsfaktorene god overensstemmelse i forhold til modellovene og modellforsøkene kan dermed implementeres til natur.

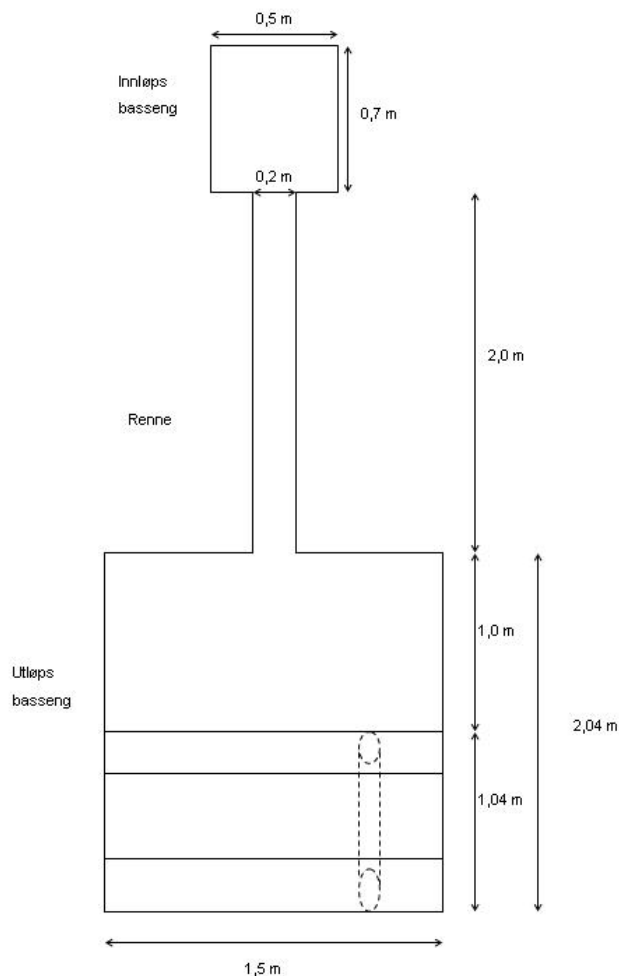
3.3 Beskrivelse av modellforsøket

Modellforsøkene er basert på en forenklet situasjon av virkeligheten. I de neste kapitlene vil den fysiske modellens oppbygging samt hvordan forsøkene er gjennomført og dokumentert bli beskrevet.

3.3.1 Tekniske spesifikasjoner

Modellen er oppbygget av tre deler som vist i Figur 3-1:

- Innløpsbasseng
- Renne
- Utløpsbasseng

**Figur 3-1 Planskisse av modellen**

Selve modellen er bygget i vannfast kryssfiner. I tillegg er det i utløpsbassenget og på tilstøtende fylling lagt perforerte plater, med 8 mm hulrom, for å øke friksjonen.

Vannføringen er beregnet ut fra Mannings formel, ligning (2-4):

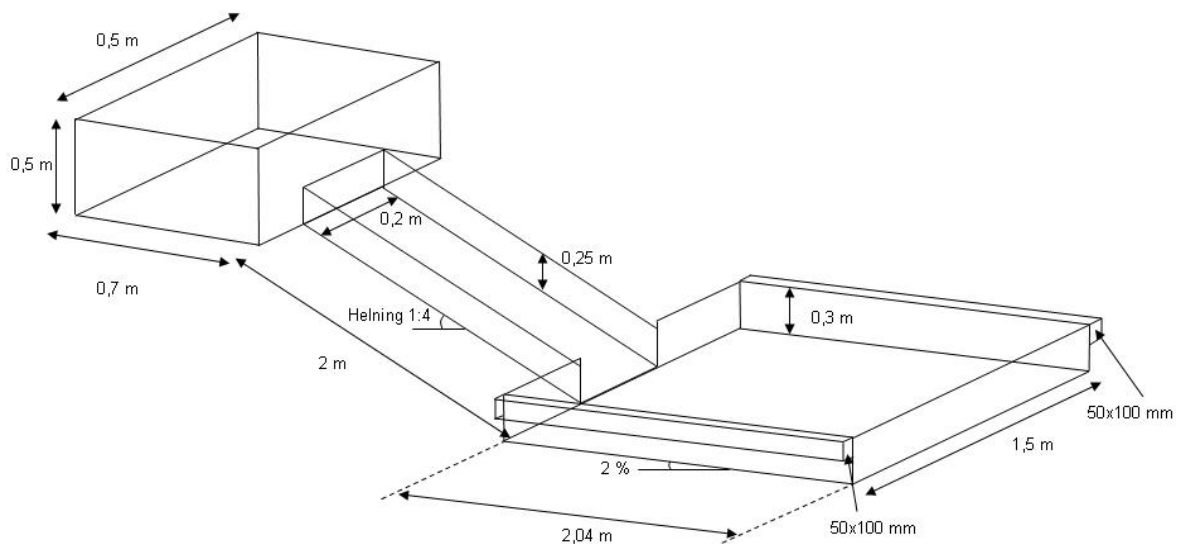
$$Q = M \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Tabell 3-3 Utregning av vannføring

Fysiske størrelser	Symbol	Benevning	Verdi
Mannings tall	M	[m ^{1/3} /s]	50 ¹⁾
Helning på renne	I		1:4
Vannhøyde	h	[m]	0,022
Bredde av renne	b	[m]	0,2
Areal	A=h*b	[m ²]	0,0044
Våt omkrets	P=2h*b	[m]	0,244
Hydraulisk radius	R=A/P	[m]	0,018
Vannføring	$Q = M \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$	[m ³ /s]	0,0076

¹⁾ Manningstallet M, i rennen, er satt til 50, noe som antyder et forholdsvis glatt underlag

Som utregningene i Tabell 3-3 viser vil vannføringen i rennen være 7,6 l/s.



Figur 3-2 Prinsippkisse av modellen

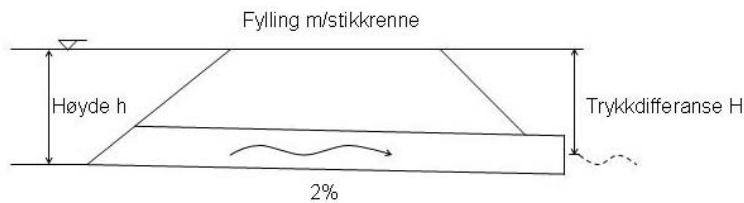
Ulike mål på modellen er gitt i Tabell 3-4 og vist i Figur 3-2. Ved lange, rette kanaler med konstant helning og tverrsnitt, som i dette tilfellet, er det rimelig å anta normalstrømning. Rennen er 2 m lang og det er tilstrekkelig for å etablere normalstrømning i kanalen.

Tabell 3-4 Tekniske spesifikasjoner for modell

Fysiske størrelser	Lengde [m]	Bredde [m]	Høyde [m]	Helning
Innløpsbasseng	0,7	0,5	0,5	
Renne	2,0	0,2	0,25	1:4 (14 °)
Utløpsbasseng	2,04	1,5	0,3	2 %

I tillegg ble det laget ulike vegelementer med og uten stikkrenne for å simulere vegfyllingen. Disse er plassert i utløpsbassenget og kan rokkes for å plassere stikkrennen i ulike posisjoner. Elementene er laget slik at de dekker den totale bredden på 1,5 m i utløpsbassenget.

Ved valg av dimensjon på stikkrenne er det viktig at den har nok kapasitet til å ta unna vannføringen på 7,6 l/s under forsøk. Kapasiteten til stikkrennen kan regnes ut fra det tapet som fås når vannet strømmer inn i stikkrennen, friksjonstapet i selve stikkrennen og tap ved utløp. Ved å se på en situasjon med vannspeil i høyde med fyllingstopp, som illustrert i Figur 3-3, vil en kunne beregne maksimal vannføring stikkrennen har kapasitet til. Den optimale dimensjon på stikkrennen er funnet ved å regne ut ulike dimensjoner og velge ut den mest gunstige i forhold til kapasitet.



Figur 3-3 Stikkrenne med utløpskontroll

Når vannspeilet er høyere enn innløpet vil en ikke ha fritt vannspeil i selve stikkrennen. På denne måten kan en regne ut vannføringen på grunn av at vått areal i stikkrennen er kjent. En slik strømmingssituasjon gir utløpskontroll og en situasjon der trykktapet på grunn av friksjon og singulærtap, det vil si innløps- og utløpstap, gjennom stikkrennen er bestemmende for vannføringen. Den totale trykkdifferansen kan finnes mellom innløp og utløp ved å summere de ulike tapsleddene gitt av:

$$H = H_i + H_f + H_u$$

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot k_u + \frac{2 \cdot g \cdot L}{M^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot k_i$$

Som gir:

$$H = \left(k_u + \frac{2 \cdot g \cdot L}{M^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} + k_i \right) \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3-10)$$

der

H = høydetap [m]

H_i = innløpstap [m]

H_f = friksjonstap [m]

H_u = utløpstap [m]

L = lengde av stikkrenne [m]

M = Mannings tall [m^{1/3}/s]

g = tyngdeakselerasjon [m/s²]

R = hydraulisk radius [m]

k_i = innløpskoeffisient

k_u = utløpskoeffisient

v = hastighet [m/s]

(Nordal, 1965)

Kapasiteten til stikkrennen vil da kunne regnes ut som vist i Tabell 3-5.

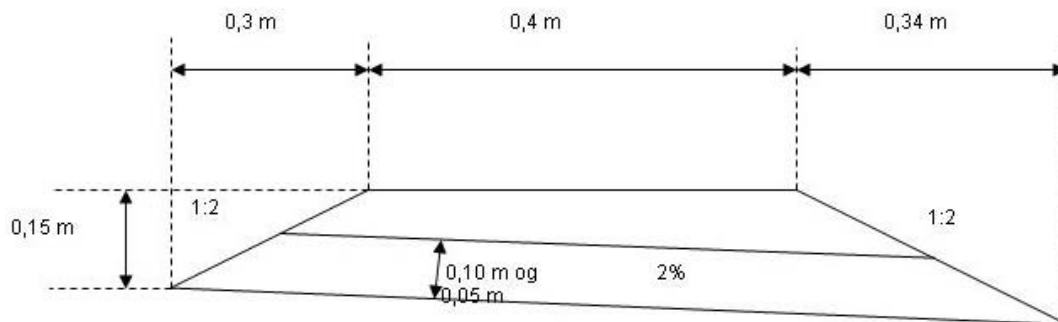
Tabell 3-5 Utregning av kapasitet til stikkrenne

Fysiske størrelser	Symbol	Benevning	Verdi lav fylling	Verdi høy fylling
Diameter på stikkrennen	d	[m]	0,1	0,1
Hydraulisk radius	$R = \frac{A}{P} = \frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{r}{2}$	[m]	0,025	0,025
Høyde på fylling	h	[m]	0,15	0,25
Lengde av stikkrenne	L	[m]	1,04	0,52

Helning på fylling	I	[%]	2	2
Høydetap	$H=h+I \cdot L-d/2$	[m]	0,1208	0,2104
Innløpskoeffisient	k_i		0,5 (Crowe m.fl., 2001)	0,5 (Crowe m.fl., 2001)
Utløpskoeffisient	k_u		1,0 (Crowe m.fl., 2001)	1,0 (Crowe m.fl., 2001)
Mannings tall	M	[m ^{1/3} /s]	100	100
Vannhastighet	$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{k_u + \frac{2 \cdot g \cdot L}{M^2 \cdot R^{\frac{3}{4}}} + k_i}}$	[m/s]	1,154	1,587
Vannføring	$Q = v \cdot A$	[m ³ /s]	0,0091	0,0125

Som utregningene viser vil en dimensjon på stikkrennen på 0,1 m ha kapasitet nok til å ta unna en vannføring på 7,6 l/s.

Det er laget to sett med vegelementer. Det første settet har en fyllingshøyde på 0,15 m. Ulike mål på elementene er gitt i Tabell 3-6 og Figur 3-4.

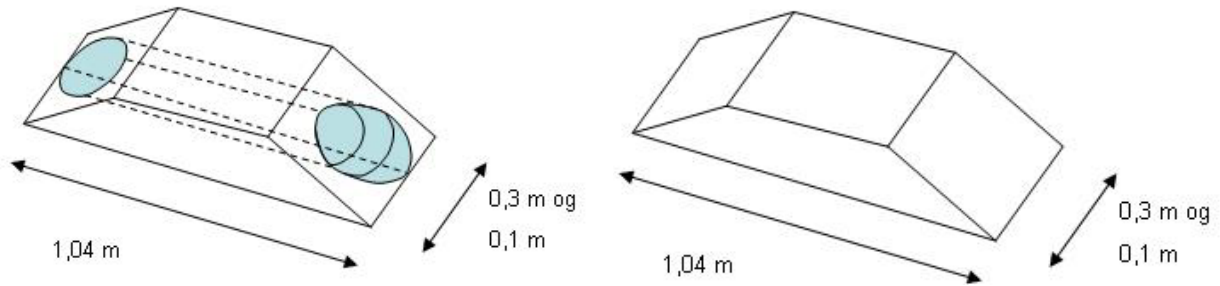


Figur 3-4 Tverrsnitt av vegelement med fyllingshøyde 0,15 m

Tabell 3-6 Tekniske spesifikasjoner for vegelement med fyllingshøyde 0,15 m

	Lengde [m]	Bredde [m]	Dimensjon på stikkrenne [m]	Antall elementer
Element uten stikkrenne	1,04	0,3		4
Element uten stikkrenne	1,04	0,1		2
Element med stikkrenne	1,04	0,3	0,10	1
Element med stikkrenne	1,04	0,1	0,05	1

Hvert av elementene er maksimalt 0,3 m brede for å få flest mulig alternativer for plassering av stikkrenne. I tillegg er det laget to elementer med stikkrenne. Et rør med diameter 0,10 m og ett med 0,05 m. Dermed blir effekten av et reserveløp undersøkt.



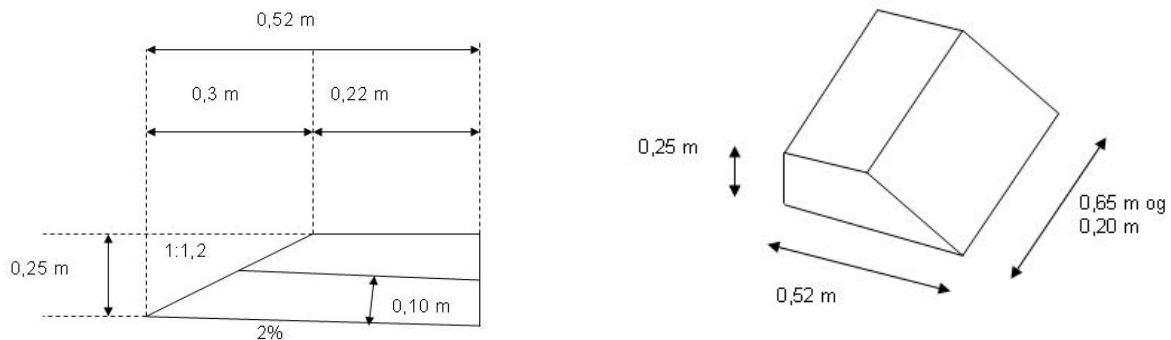
Figur 3-5 Vegelement med og uten stikkrenne for fyllingshøyde 0,15 m

Det neste settet med vegelementer har en fyllingshøyde på 0,25 m. Her er antall kombinasjoner av elementer begrenset. Elementene er i tillegg halvert i forhold til den lave fyllingen fordi lengden på fyllingen har liten innvirkning på strømningssituasjonen. For eksempel vil en for den konstante vannføringen på 7,6 l/s få et singulærtap på 0,192 m og et friksjonstap på 0,018 m. Singulærtapet er dermed det dominerende tapet og forandring av lengde på stikkrenne vil dermed ikke ha så stor innvirkning.

Mål på elementene er gitt i Tabell 3-7 og Figur 3-6.

Tabell 3-7 Tekniske spesifikasjoner for vegelement med fyllingshøyde 0,25 m

	Lengde [m]	Bredde [m]	Dimensjon på stikkrenne [m]	Antall elementer
Element uten stikkrenne	0,52	0,65		2
Element med stikkrenne	0,52	0,20	0,10	1



Figur 3-6 Tverrsnitt av vegelement med fyllingshøyde 0,25 m

Under forsøk vil en få en viss vannhøyde i bassenget. Teoretisk vannhøyde i bassenget under forsøk kan regnes ut etter formel (3-10), gitt som:

$$H = \left(k_u + \frac{2 \cdot g \cdot L}{M^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} + k_i \right) \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

I Tabell 3-8 er beregninger gjort for oppstillinger med en stikkrenne for henholdsvis lav og høy fylling. Beregningene forutsetter at masse ikke er tilsatt, fordi tilsetning av masse kan redusere kapasiteten til stikkrennen.

Tabell 3-8 Utregning av teoretisk vannstand i basseng

<i>Fysiske størrelser</i>	<i>Symbol</i>	<i>Benevning</i>	<i>Verdi lav fylling</i>	<i>Verdi høy fylling</i>
Diameter på stikkrennen	d	[m]	0,1	0,1
Hydraulisk radius	$R = \frac{A}{P} = \frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{r}{2}$	[m]	0,025	0,025
Høyde på fylling	h	[m]	0,15	0,25
Lengde av stikkrenne	L	[m]	1,04	0,52
Helning på fylling	I	[%]	2	2
Innløpskoeffisient	k_i		0,5 (Crowe m.fl., 2001)	0,5 (Crowe m.fl., 2001)
Utløpskoeffisient	k_u		1,0 (Crowe m.fl., 2001)	1,0 (Crowe m.fl., 2001)
Mannings tall	M	[m ^{1/3} /s]	100	100
Vannføring	Q	[m ³ /s]	0,0076	0,0076
Vannhastighet	v	[m/s]	0,968	0,968
Trykkdifferanse	$H = \left(k_u + \frac{2 \cdot g \cdot L}{M^2 \cdot R^3} + k_i \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$	[m]	0,085	0,078
Vannhøyde	$h = H + \frac{d}{2} - I \cdot L$	[m]	0,114	0,118

Ut fra beregningene får vi at forventet vannstand for lav fylling er 11,4 cm mens for høy fylling er den 11,8 cm. Forskjellen i vannstand varierer dermed lite med høyden på fyllingen.

Steinmateriale brukt i forsøkene er Vassfjell. Forsøkene er utført med relativt ensgradert masse i to ulike fraksjoner:

- grus i fraksjonen 8 mm < d < 11 mm
- grus i fraksjonen 16 mm < d < 22 mm

Forventet sedimentasjonslengde for de to ulike fraksjonene kan beregnes som vist i Tabell 3-9. Fraksjonene er delt inn i to representative partikkelstørrelser, d = 0,01 m og d = 0,02 m. Vannføringen er konstant 7,6 l/s. Vannhøyden endrer seg i stor grad mellom renne og sedimentasjonsbasseng på grunn av endring i strømningsforhold. Fra en vannhøyde på 2,2 cm i rennen øker den teoretiske vannstanden i bassenget til 11-12 cm. Denne økningen i vannstand vil innvirke på sedimentasjonslengden. Antar at en gjennomsnittsverdi på vannstanden på 7 cm er karakteristisk for hvor høyt massen løftes.

Tabell 3-9 Utregning av sedimentasjonslengde

<i>Fysiske størrelser</i>	<i>Symbol</i>	<i>Benevning</i>	<i>Verdi</i>	
Vannhastighet	v	[m/s]	1,72	
Fallhastighet	$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d}{\rho \cdot C_D}}$	[m/s]	d = 0,01 m 0,657	d = 0,02 m 0,929
Vannstand i overgang renne/sedimentasjonsbasseng	h	[m]	0,07	0,07
Sedimentasjonslengde	$X_c = 4,6 \cdot \frac{h \cdot v}{\omega}$	[m]	0,84	0,59

Forventet sedimentasjonslengde er 84 cm for den minste fraksjonen og dermed lengre enn for den større fraksjonen som har en forventet sedimentasjonslengde på 59 cm.

Under forsøk vil utstyr som avleser vannføringen og vibratormaskin som tilfører materiale til vannstrømmen, bli brukt. Disse er vist i Figur 3-7.



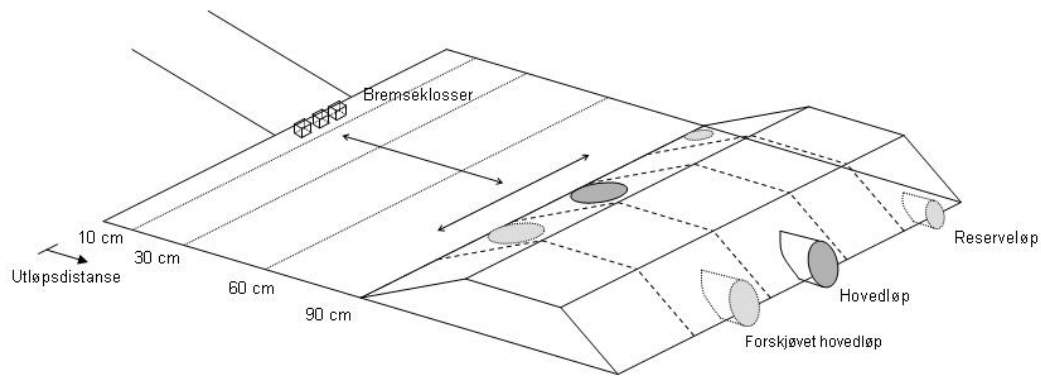
Figur 3-7 Utstyr brukt under forsøk. Vannføringsavleser i bildet til venstre og vibratormaskin i bildet til høyre

3.3.2 Forsøksprosedyre

Forsøket er gjennomført ved å plassere ulike vegelementer, med og uten stikkrenne, i enkelte utvalgte kombinasjoner. I hvert av forsøkene er elementer satt opp tilsvarende en samlet bredde på 1,5 m.

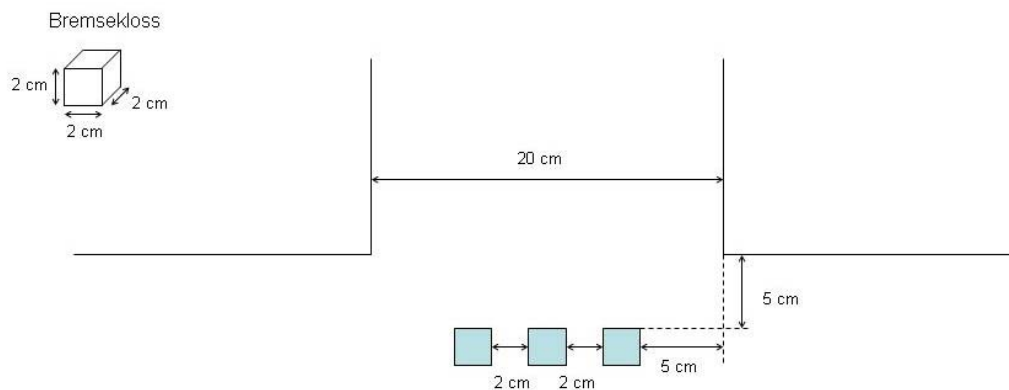
Vegmodellen skal flyttes horisontalt i lengderetningen for å variere utløpsdistansen. Fire ulike bassenglengder er undersøkt: 10, 30, 60 og 90 cm.

De aktuelle forsøksseriene tar dermed hensyn til ulike bassenglengder og plassering av stikkrenne som vist i Figur 3-8. For vegelementer med høyde 15 cm vil forsøksseriene i tillegg ta hensyn til kombinasjon av hovedløp og reserveløp som presentert i Tabell 3-10. Vegelementer med høyde 25 cm vil kun variere plasseringen av hovedløpet som vist i Tabell 3-11.



Figur 3-8 Modellelementene varieres både i tverr- og lengderetning

Forsøkene er utført på ru overflate uten tiltak og ved bruk av innsatte bremsklosser. Dermed fås et tvungent vannstandssprang i sistnevnte tilfelle. Bremsklosser er plassert som illustrert i Figur 3-9.



Figur 3-9 Plassering av bremsklosser

De aktuelle oppstillingene ble utført som illustrert Figur 3-8, Tabell 3-10 og Tabell 3-11. 2,5 l material, ca. 4,9 kg, ble plassert i vibratormaskinen. Deretter ble vannet skrudd på til det stabiliserte seg på en vannføring på 7,6 l/s avlest på vannføringsavleseren. Når vannet har oppnådd en stabil strømnings-situasjon ble vibratormaskinen satt på og massen ble dermed tilført rennen kontinuerlig. Når all massen var tilsatt ble vannet skrudd av og det strømmet ut av systemet. Derfra ble avsettingsmønster registrert.

Den første forsøksserien ble utført på fyllingshøyde 0,15 m. Oversikt over forsøksprogrammet er vist i Tabell 3-10. Hver oppstilling ble kjørt med og uten bremsklosser. I tillegg er det utført repetisjon av hvert forsøk for å sikre repeterbarheten.

Forsøksserie 1:

Tabell 3-10 Forsøksprogram for vegelement med høyde 15 cm

Utløpsdistanse	10 cm	30 cm	60 cm	100 cm
Kombinasjon				
Hovedløp	X	X	X	X
Forskjøvet hovedløp	X	X	X	
Hovedløp og reserveløp		X	X	

Den andre forsøksserien er utført på fyllingshøyde 0,25 m. De ulike forsøkene som er utført er vist i Tabell 3-11. Hver oppstilling ble også her utført både med og uten bremseklosser og med tilhørende repetisjon.

Forsøksserie 2:

Tabell 3-11 Forsøksprogram for vegelement med høyde 25 cm

<i>Utløpsdistanse</i>				
<i>Kombinasjon</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>60 cm</i>	<i>100 cm</i>
<i>Hovedløp</i>	X	X	X	X
<i>Forskjøvet hovedløp</i>	X	X	X	

3.3.3 Målinger ved forsøk

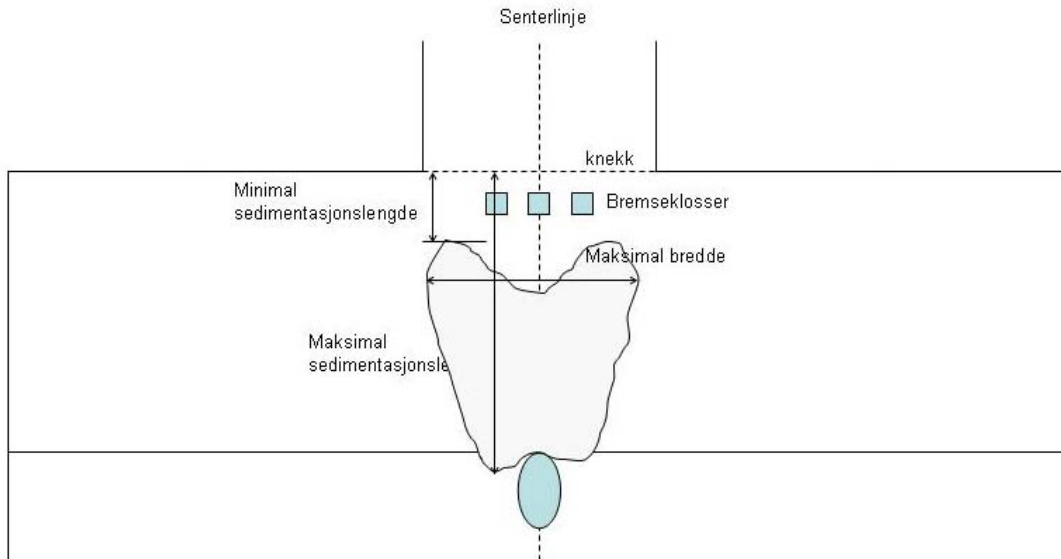
Den beregnede vannhastigheten i rennen ble undersøkt ved å måle vannhøyden i rennen under forsøk. På denne måten ble det kontrollert om beregningene og forsøket var riktig. Vannhøyden ble målt til å være 2,2 - 2,3 cm noe som stemmer overens med en vannhøyde på 2,2 cm som er brukt i de beregningene som er gjort.

Den beregnede bunnlasten, utregnet i Tabell 2-3 for partikkelstørrelse $d = 0,01$ m, er 0,41 kg/s. For partikkelstørrelse $d = 0,02$ m er bunnlasten på 0,31 kg/s. Dette ble kontrollert ved å registrere tiden det tar å tilsette 4,9 kg masse ved bruk av vibratormaskin. Tiden lå rundt 20 sekunder noe som tilsvarer en tilsetning på 0,25 kg/s. På grunn av begrensinger i utstyret er det ikke mulig å oppnå høyere tilsetningshastighet og bunnlasten vil dermed være lavere enn utregnet verdi.

Det viktigste ved forsøket var å registrere avsetningsmønsteret for å se hvordan det varierer under ulike oppsett. Tre hovedpunkter er undersøkt:

- Utbredelse
 - Maksimal bredde [m]
 - Maksimal sedimentasjonslengde [m]
 - Minste avstand fra bremseklosser til der massen avsettes [m]
 - Maksimal avsetning på fylling [m]
- Profil av materialet på senterlinjen [m]
- Mengde material [kg] som ikke avsettes i sedimentasjonsbassenget

Registreringene ble foretatt som vist på Figur 3-10.



Figur 3-10 Målinger ved forsøk

I tillegg til de ulike registreringene har observasjoner under forsøket blitt gjort. Her er det spesielt strømningssituasjonen før og etter sedimenter blir tilsatt som er interessant. I tillegg er det observert hvordan strømningssituasjonen endrer seg før og etter bremseklosser innføres og ved ulike oppsett. Gjennomsnittlig vannstand i bassenget før tilsetning og etter tilsetning av masse er notert. Andre observasjoner som er gjort er konsentrert rundt avsetning av masser.

Dokumentasjon av forsøkene er gjort ved hjelp av fotografering, manuell måling med tommestokk og bruk av vekt.

- Avsetningsmønster er fotografert
- Utbredelse er funnet ved manuell måling
- Profilhøyde er funnet ved manuell måling av avsetningsmønsteret
- Mengde material ble målt på digital vekt

4 Resultater fra modellforsøk

Strømnings situasjonen spiller en stor rolle ved avsetting av masser. Modellforsøkene har vist at strømnings situasjonen varierer med bassenglengden og plassering av stikkrenne, men størst endring har man fått ved bruk av bremseklosser. Bremseklosser framprovoserer vannstandssprang som fører til rask avsetting av masser. Uten bremseklosser har man i de fleste tilfeller fått jetstrøm, en konsentrert strømning, som har fraktet med seg mesteparten av massen. Unntaket her er bruk av forskjøvet hovedløp. Et slikt oppsett har ført til at fyllingen har provosert fram et vannstandssprang.

Med hensyn til avsetting av masse er det to ulike strategier som er undersøkt:

- selvrensende stikkrenne der vannstrømmen holder stikkrennen fri for masse og
- utfelling av partikler før stikkrenne

Resultatene fra modellforsøkene er delt opp i tre hoveddeler, som er relatert til oppsettet. For hvert oppsett er to ulike materialer brukt, og i tillegg er forsøkene utført med og uten bremseklosser for å provosere fram vannstandssprang. Sedimentasjonslengdene blir vurdert for hvert oppsett sammen med eventuell andel masse i sandfang. I tillegg vil avsettingsprofil bli fremstilt. Observasjoner som er gjort under forsøk vil være relatert til strømnings situasjon og avsetting av masser og vil presenteres under hver del.

4.1 Sentrert hovedløp

Sentrert hovedløp er det oppsettet som er mest vanlig å bruke i praksis. Sentrert hovedløp har den fordel at det ligger i strømningsretningen og dermed blir mesteparten av vannet direkte ført bort gjennom stikkrennen, noe som bidrar til at vannspeilet i bassenget holder seg lavt. Noe vann strømmer i de fleste tilfeller over vegen i forsøk ved bruk av lav fylling. For høy fylling får en ikke strømning over vegen. Eksempel på oppsett med sentrert hovedløp er vist i Figur 4-1.



Figur 4-1 Sentrert hovedløp med 30 cm basseng. Bildet til høyre viser oppsett med bremseklosser

Ved bruk av bremseklosser provoseres et vannstandssprang fram. Bremseklosser reduserer energien til vannstrømmen og dette fører til raskere avsetning av masse. Det er ved bruk av bremseklosser at det i enkelte forsøk har satt seg material i stikkrennen. Dette har ført til redusert kapasitet og høyere vannstand i bassenget. Uten bruk av bremseklosser ble det observert en jetstrøm. Jetstrømmen fraktet med seg mesteparten av massen gjennom stikkrennen og ut i sandfanget. En stabil jetstrøm kan rense løpet og på den måten vil hele problematikken med avsetning av masse i stikkrenne forsvinne. For å rense løpet kreves det en minste kritisk vannmengde for å sikre at stikkrennen får regelmessig rensing. En svakhet med jetstrøm er at man risikerer at det kan oppstå hinder i strømningsretningen. Dette kan framprovosere vannstandssprang eller kutte jetstrømmen slik at det blir avsetning i og foran stikkrenne. I forsøkene som ble utført uten bremseklosser ble det i hvert tilfelle en tydelig og stabil jetstrøm. I praksis vil man ikke ha slike kontrollerte omgivelser og usikkerheten rundt stabiliteten til jetstrømmen vil være stor.

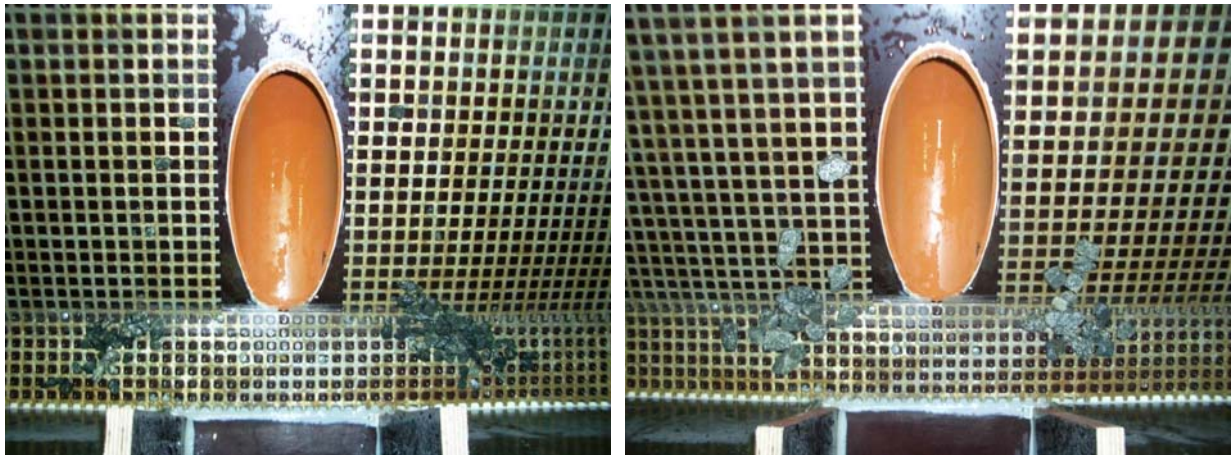
Masse i to ulike fraksjoner ble brukt, Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22. Tendensen har vært at massen med minst fraksjon har gitt mer spredt avsetning i forhold til Vassfjell 16-22 som har gitt mer konsentrert avsetning. I tillegg er det kun Vassfjell 8-11 som har gitt avsetning i stikkrenne.

4.1.1 Lav fylling

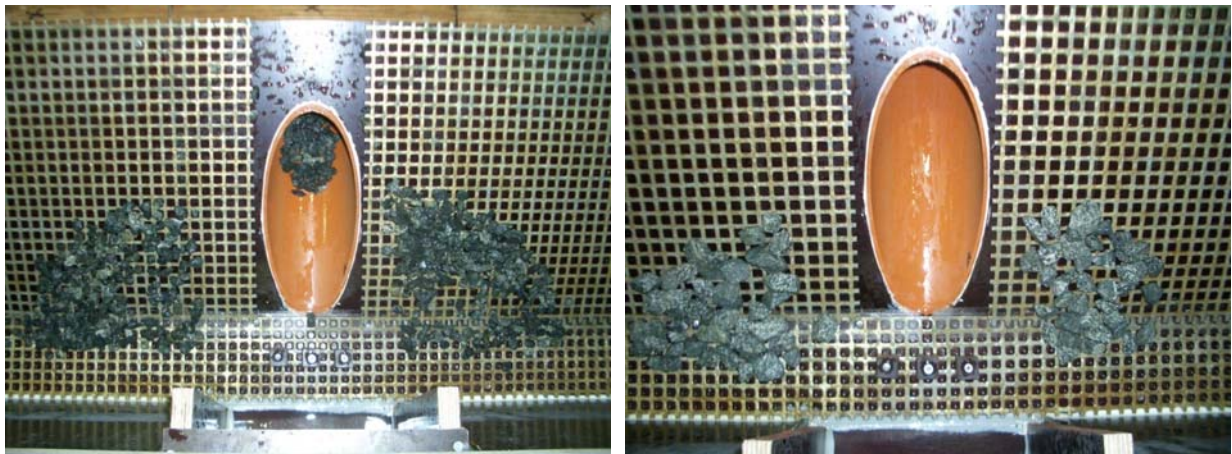
10 cm sedimentasjonsbasseng:

Forsøk utført med 10 cm langt basseng og uten bruk av bremseklosser ga en tydelig jetstrøm. Mesteparten av massen ble her fraktet gjennom stikkrennen og ut i sandfanget. Under forsøkene holdt vannstanden seg lav. Noe vann sprutet i tillegg over vegen. Avsetningen er vist i Figur 4-2. Ved bruk av bremseklosser ble det derimot mer avsetning som vist i Figur 4-3. Her ser vi tydelig at bremseklossene har medført avsetning i stikkrennen for Vassfjell 8-11, noe som ga tydelig kapasitetsreduksjon for stikkrennen. Det er klare observasjoner på økt vannspeil og mer vann som strømmet over vegen etter

at massen ble tilsatt og avsatt i stikkrennen. For Vassfjell 16-22 ble det ikke avsatt masse i selve stikkrennen og det ble heller ikke observert noe markert reduksjon av kapasiteten.



Figur 4-2 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

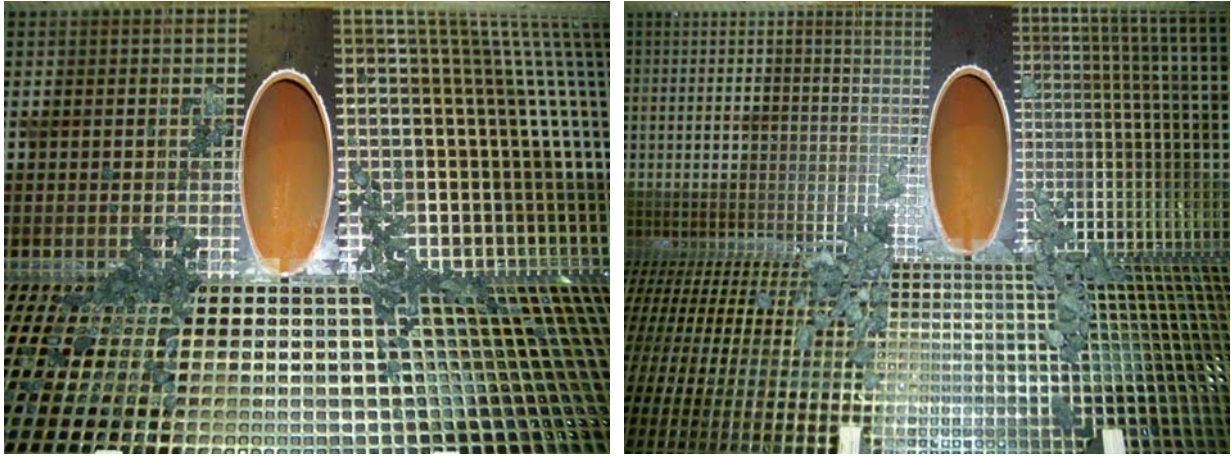


Figur 4-3 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

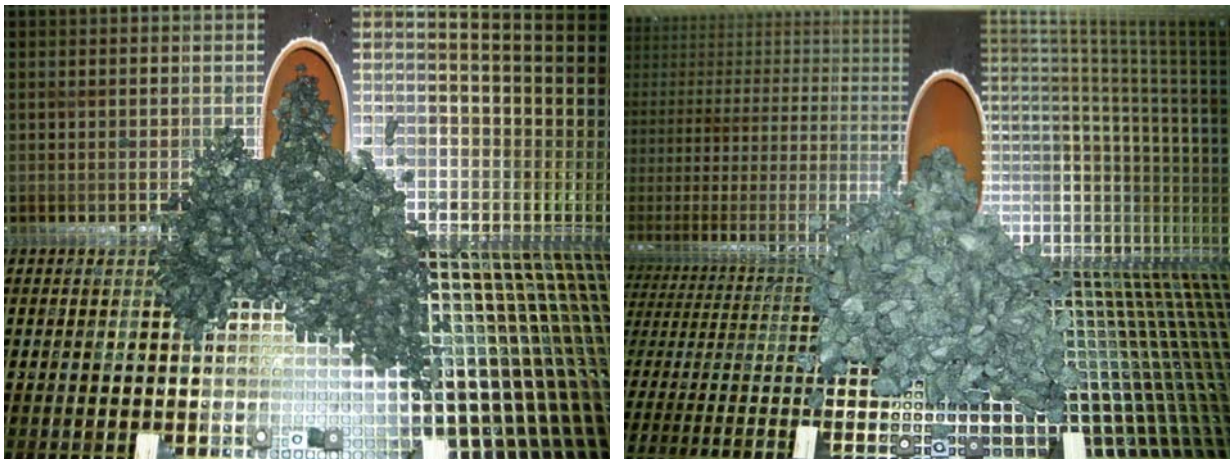
Ved å sammenligne forsøkene med og uten bremseklosser vist i Figur 4-2 og Figur 4-3 ser vi klart at bruk av bremseklosser gir mer avsetning. I tillegg ga Vassfjell 8-11 uønsket avsetning i stikkrennen. Et 10 cm langt basseng er sårbart i forhold til gjentetting av stikkrenne. Uten bremseklosser er risikoen for gjentetting til stede ved at den stabile jetstrømmen blir avskjært eller går over til vannstandssprang.

30 cm sedimentasjonsbasseng:

For et 30 cm langt basseng, uten bremseklosser får den karakteristiske jetstrømmen. Under forsøkene var vannstanden lav og det strømmet ikke vann over vegen. Avsetningsmønsteret var forholdsvis likt som for et 10 cm basseng, bortsett fra at mer masse ble avsatt. Dette er vist i Figur 4-4. I figuren ser vi også at litt av avsetningen skjer langs jetstrømmen. I tilfellet med bruk av bremseklosser er avsetningsmønsteret annerledes, som Figur 4-5 viser. Både Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22 blir avsatt foran og i selve stikkrennen. I begge tilfeller blir kapasiteten mindre og vannspeilet og mengden vann over vegen øker. Før tilsetning av masse var det noe vann som sprutet over vegen. Denne mengden økte etter at massen ble tilsatt. Som for et 10 cm langt basseng er en grøftelengde på 30 cm sårbart for gjentetting.



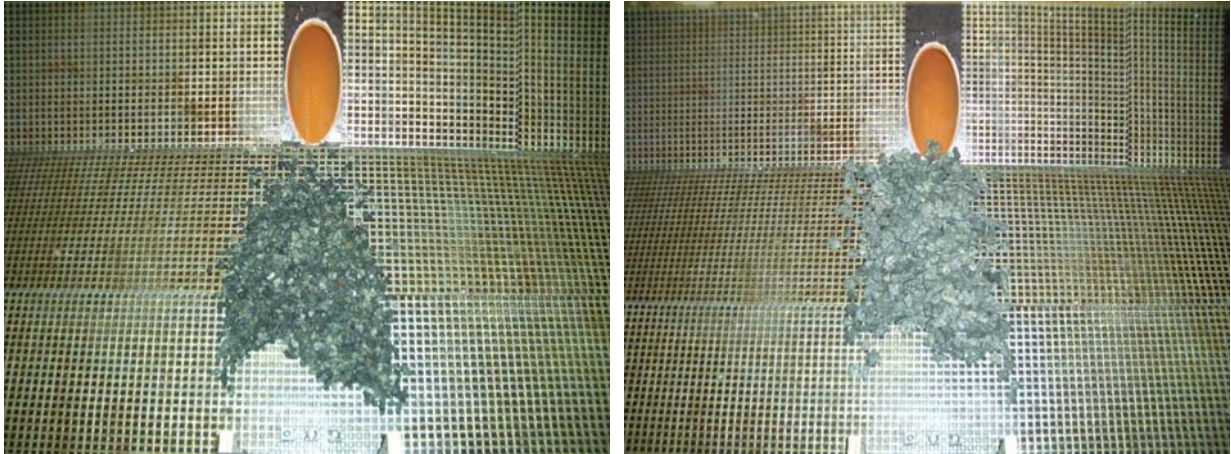
Figur 4-4 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre



Figur 4-5 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

60 cm sedimentasjonsbasseng:

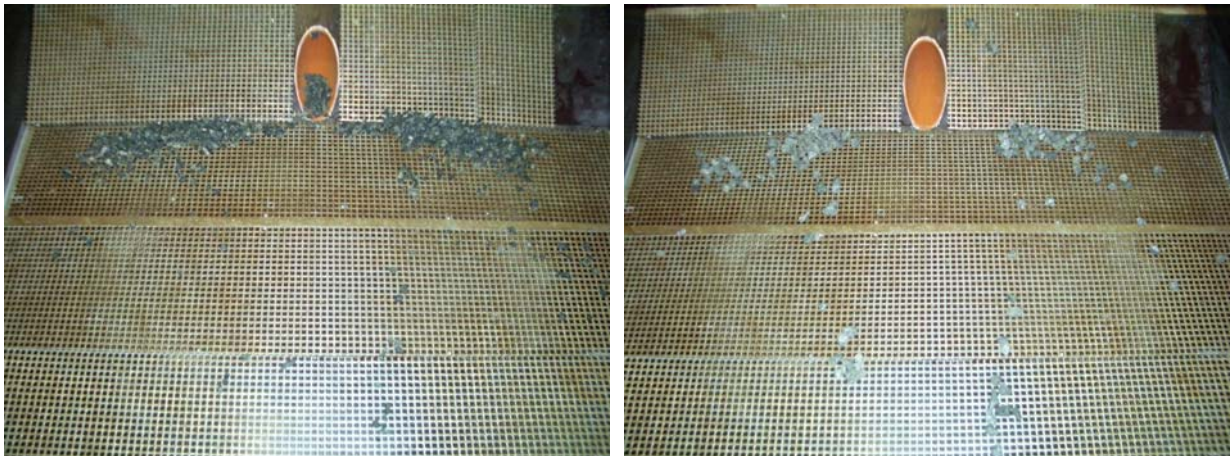
Forsøk utført med et 60 cm langt basseng og uten bremseklosser ga en tydelig jetstrøm. Avsetningsmønsteret ble som for et 30 cm basseng, der mesteparten av massen ble ført med jetstrømmen gjennom stikkrennen og ut i sandfanget. Resten av massen ble avsatt langs jetstrømmen og ved fyllingen. Vannstanden var lav og det strømmet ikke vann over vegen. For forsøk utført med bremseklosser ble mesteparten av massen avsatt før stikkrennen som vist i Figur 4-6. En slik avsetning førte til noe høyere vannstand og strømming av vann over vegen.



Figur 4-6 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

90 cm sedimentasjonsbasseng:

Vannstanden i bassengene har økt etter lengden av disse bassengene for forsøk utført uten bremseklosser. For 10 og 30 cm basseng var vannstanden lav, men den ble høyere for 60 cm basseng. Dette synes ikke å ha innvirkning på avsetningsmønsteret. For et basseng med lengde 90 cm, og høyere vannstand, ble derimot avsetningen tydelig mer spredt. Selv om forsøkene uten bremseklosser ga den samme jetstrømmen som i de foregående forsøkene ble avsetningsmønsteret annerledes med mer spredning av materialene som vist i Figur 4-7. Dette henger nok sammen med vannmengde i bassenget. På denne måten blir ikke jetstrømmen like markert og materialet har lettere for å avsettes. For forsøk med bruk av Vassfjell 8-11 ble jetstrømmen utydelig. Noe av massen avsattes i stikkrennen og dette medførte en mindre tydelig jetstrøm. I tillegg ble vannspeilet høyere og mye vann strømmet over vegen.



Figur 4-7 Oppsett av 90 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

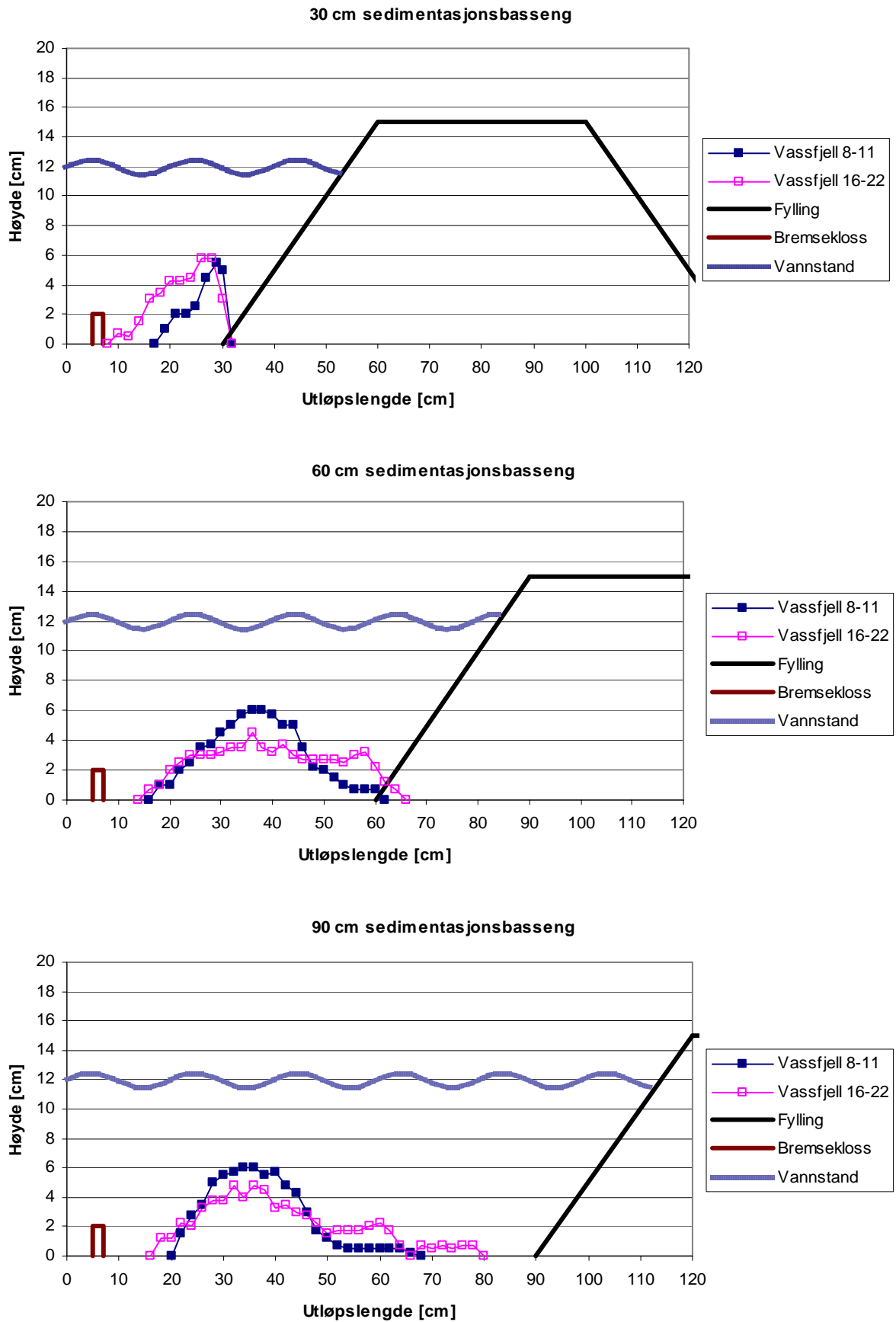


Figur 4-8 Oppsett av 90 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

Forsøk utført med bremseklosser, på et 90 cm basseng, ga en avsetning før stikkrennen. En kan se av Figur 4-8 at mesteparten av massene er avsatt før en lengde på 60 cm. Avsetningsmønsteret er ganske ensartet med det som framkom ved forsøk med 60 cm basseng. Under forsøkene var vannstanden i bassenget høyt. Før tilsetning av masse strømmet litt vann over vegen. Etter tilsetning økte mengde vann over vegen.

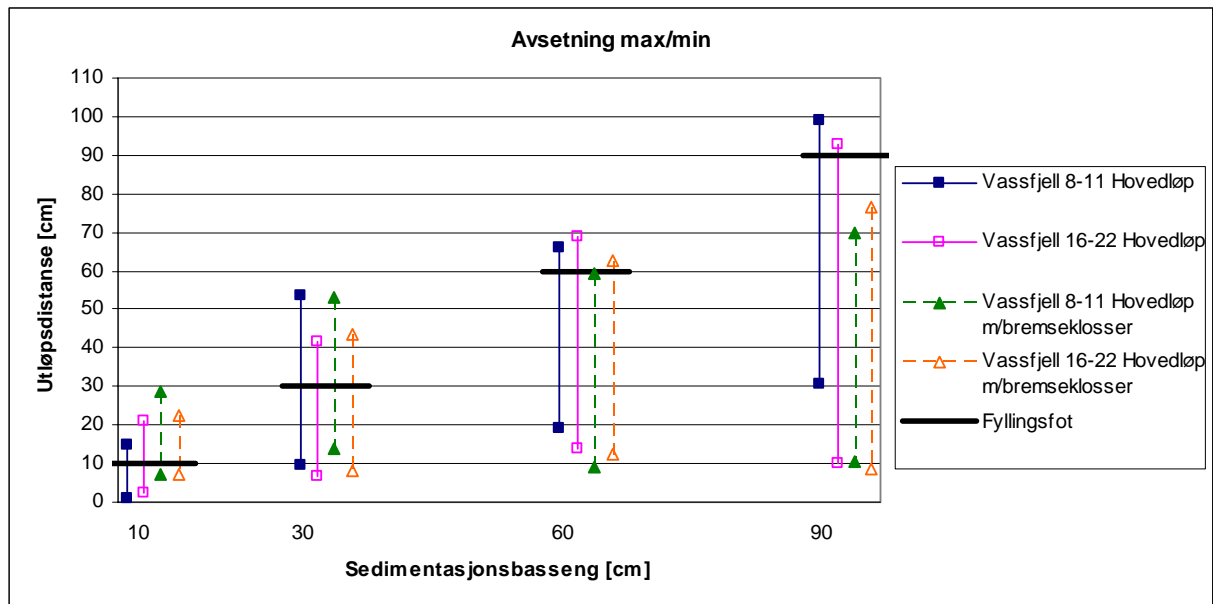
Profilen for avsetning på senterlinjen er tatt for forsøk utført med bremseklosser og framstilt i Figur 4-9. Her er også gjennomsnittlig vannstand i de ulike forsøkene indikert. Til forskjell fra forsøk utført uten bremseklosser, der vannstanden økte med lengden av bassenget, har vannstanden ved bruk av bremseklosser vært forholdsvis konstant for alle forsøk.

Profilen illustrerer hvordan massene avsettes i forhold til utløpslengde og høyde. Både en lengde på 30 cm og 60 cm gir avsetning i stikkrenne. Avsetningsmønsteret for 60 cm og 90 cm lengde er ganske likt. For begge tilfellene er det Vassfjell 16-22 som avsettes lengst. Vassfjell 8-11 har en maksimal høyde rundt 6 cm, mens Vassfjell 16-22 ligger omtrent 1 cm lavere.



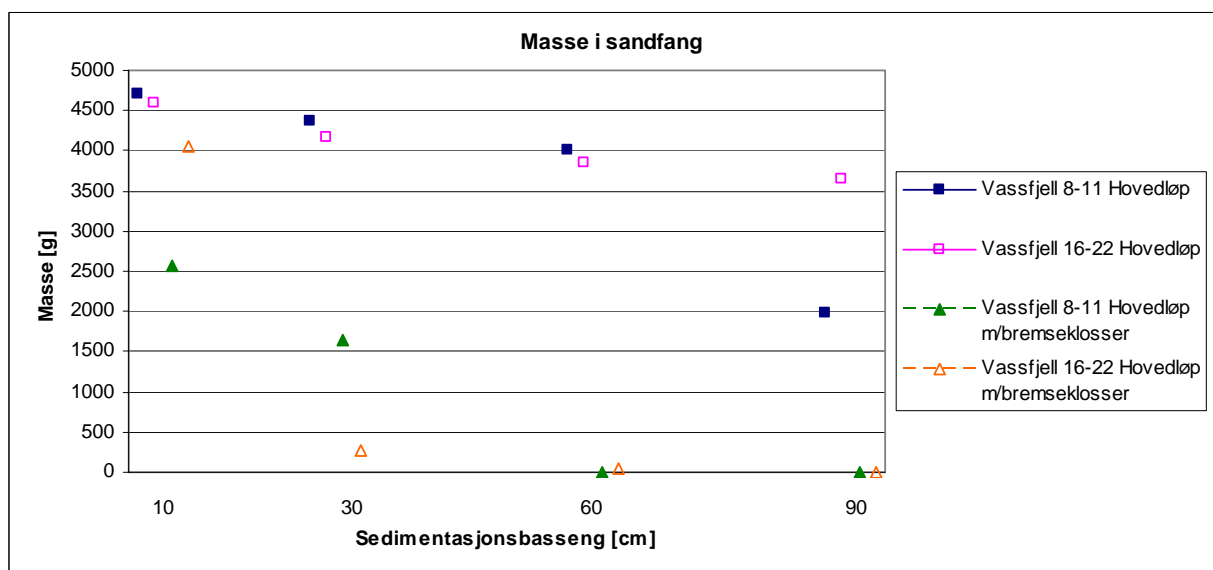
Figur 4-9 Profil av senterlinjen for sentrert hovedløp med bremseklosser

Ved å se på maksimal og minimal sedimentasjonslengde fås resultater som vist i Figur 4-10. Sedimentasjonslengdene varierer for hvert forsøk og målingene er gjort der en har funnet maksimal og minimal avsetning. De fleste forsøk uten bruk av bremseklosser har en maksimal avsetning på fylling. De fleste forsøk utført med bremseklosser har en maksimal avsetning i stikkrennen. Som en ser av Figur 4-10 så øker lengden på avsetningen med lengden på bassenget. Ved bruk av bremseklosser vil en få en lavere maksimal avsetning. I tilfellet med 10 cm basseng øker bremseklossene den maksimale avsetningen.



Figur 4-10 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med sentrert hovedløp

For å se hvor mye mengde masse som ikke blir avsatt har andel masse i sandfang blitt registrert. Som Figur 4-11 antyder vil andel masse som går gjennom stikkrenne synke ved økende lengde på sedimentasjonsbassenget. Uten bruk av bremseklosser vil en forholdsvis stor andel masse bli ført med jetstrømmen gjennom stikkrennen. Med bruk av bremseklosser får en avsatt masse tidligere og dermed vil andel masse i sandfang være mindre enn for tilsvarende forsøk uten bremseklosser.



Figur 4-11 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp

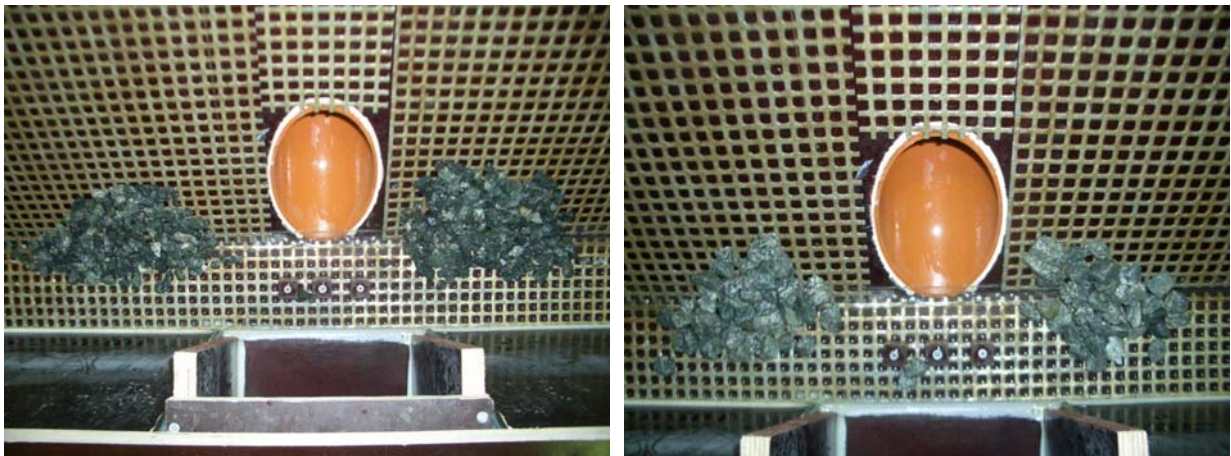
4.1.2 Høy fylling

10 cm sedimentasjonsbasseng:

Forsøk utført med 10 cm basseng og uten bruk av bremseklosser ga et vannstandssprang og ikke den jetstrømmen som var forventet å opptre. Forskjellen i avsetning for forsøk gjort med og uten bremseklosser ble dermed liten. Dette er vist i Figur 4-12 og Figur 4-13. Mesteparten av massen ble her fraktet gjennom stikkrennen og ut i sandfanget. I tillegg ble det ikke avsatt masse i selve stikkrennen. Vannstanden under forsøk var i overkant av stikkrennen og tilsetning av masse ga ingen endring på denne.



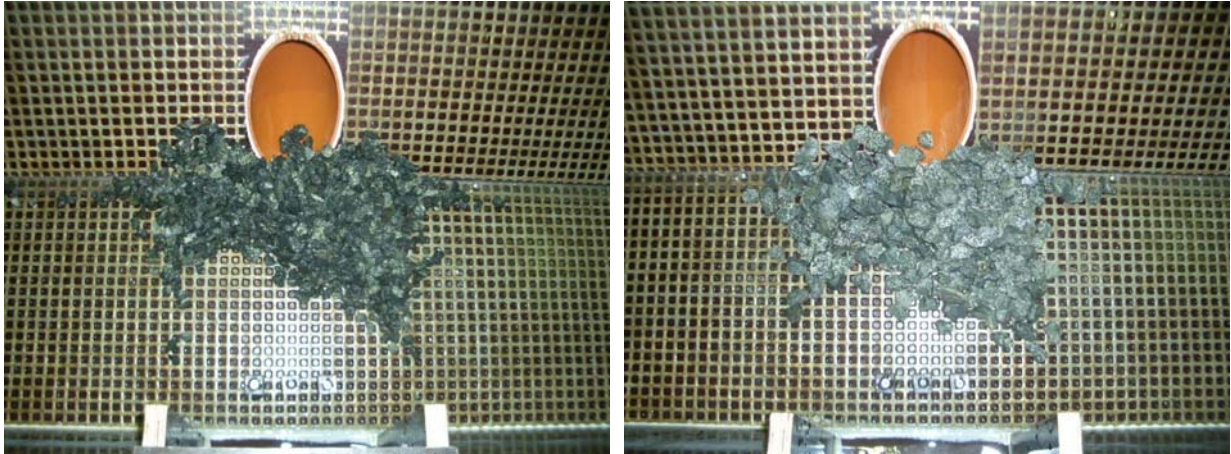
Figur 4-12 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre



Figur 4-13 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

30 cm sedimentasjonsbasseng:

For 30 cm basseng og uten bruk av bremseklosser ble det etablert jetstrøm. Som for lav fylling ble mesteparten av massen fraktet med gjennom stikkrennen til sandfanget. Avsetningsmønsteret er derimot mer spredt enn for 10 cm basseng, men massen avsattes ikke i og foran stikkrennen. Under forsøkene var vannstanden lav og den endret seg ikke etter tilsetning. Ved bruk av bremseklosser fås et vannstandssprang og avsetningen er mer konsentrert rundt og i innløpet av stikkrennen som Figur 4-14 viser. Kapasiteten blir dermed svekket og vannspeilet øker.



Figur 4-14 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

60 cm sedimentasjonsbasseng:

En tydelig jetstrøm er fremtredende i forsøk utført for 60 cm basseng uten bremseklosser. Vannstanden for forsøk er i overkant av stikkrennen. Som Figur 4-15 viser, avsettes mesteparten av massene i og rundt innløpet. Dette medfører lavere kapasitet og høyere vannstand. Ved bruk av bremseklosser avsettes massen før innløpet og dermed fås mindre endring av kapasitet og vannstand enn i forsøk uten bremseklosser.



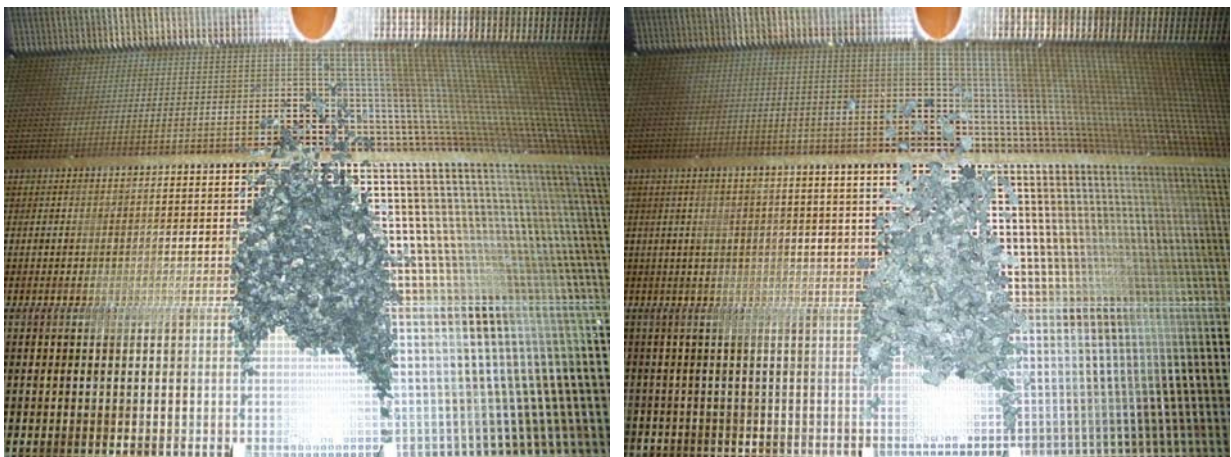
Figur 4-15 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

90 cm sedimentasjonsbasseng:

For 90 cm basseng uten bremseklosser fremtrer en strømningssituasjon der jetstrømmen er ustabil. I forhold til lav fylling der jetstrømmen strømmer direkte på stikkrenne varierer jetstrømmen her fra side til side av bassenget. Den ustabile jetstrømmen er nok årsaken til at avsetningsmønsteret blir såpass spredt. Se Figur 4-16. Ved bruk av bremseklosser fås et framprovosert vannstandssprang med tilhørende rask avsetning. Som for lav fylling avsettes mesteparten av massen før 60 cm. Avsetningsmønsteret er fremstilt i Figur 4-17. For oppsett uten bremseklosser fører avsetningen til at kapasiteten til stikkrennen svekkes og vannstanden økes fra overkant av stikkrenne til halvveis opp på fyllingen. Ved bruk av bremseklosser har avsetningen ingen betydning for kapasitet og vannstand.

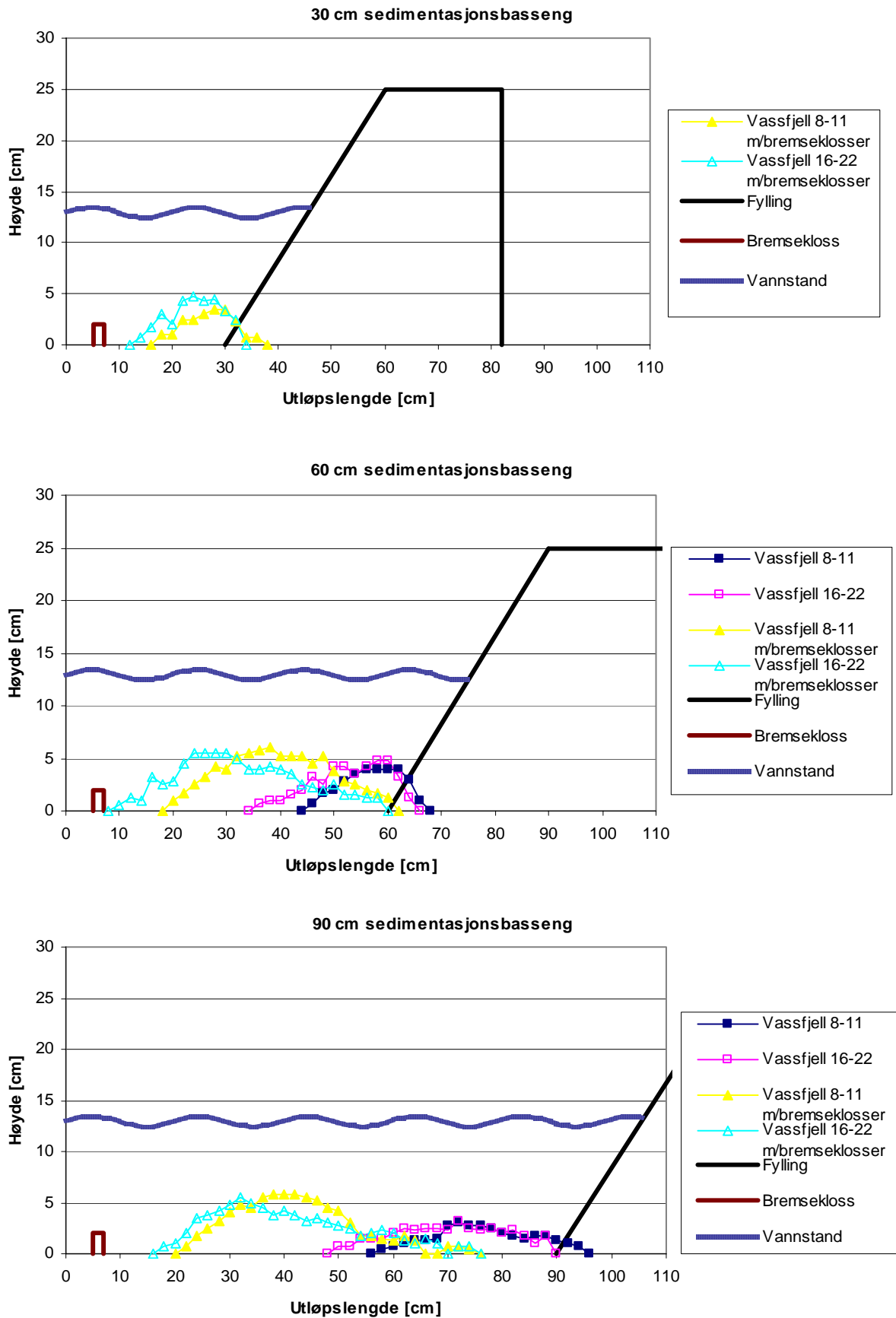


Figur 4-16 Oppsett av 90 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre



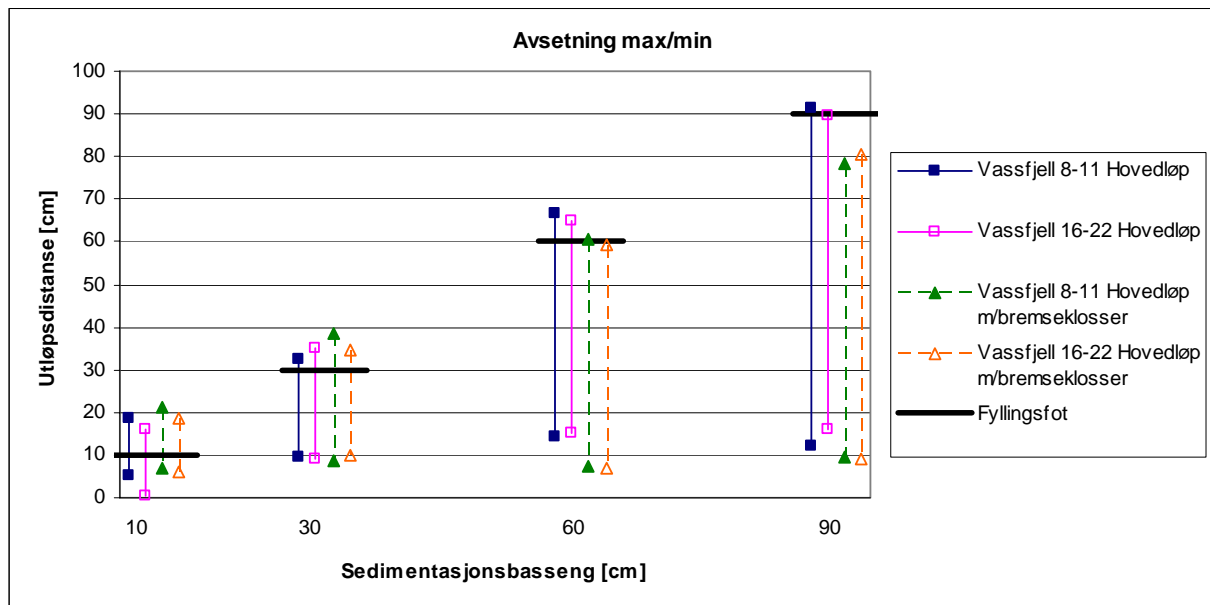
Figur 4-17 Oppsett av 90 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

For forsøk utført med og uten bremseklosser er profil tatt for avsetning på senterlinjen og framstilt i Figur 4-18. For 30 cm basseng fås ingen avsetning på senterlinjen for forsøk utført uten bremseklosser. For 60 cm og 90 cm basseng fås avsetning i og ved innløpet til stikkrennen. For forsøk utført med bremseklosser avsettes massen i innløpet til stikkrennen for både 30 cm og 60 cm basseng. For 90 cm basseng avsettes massen i en avstand på ca. 10 cm fra innløpsområdet. Tendensen for de tre ulike bassenglengdene viser at Vassfjell 16-22 avsettes først, men det viser seg at både Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22 har omtrent like lang utstrekning i lengderetningen. Av figuren fremgår også tydelig at bruk av bremseklosser fører til raskere avsetning av masse.



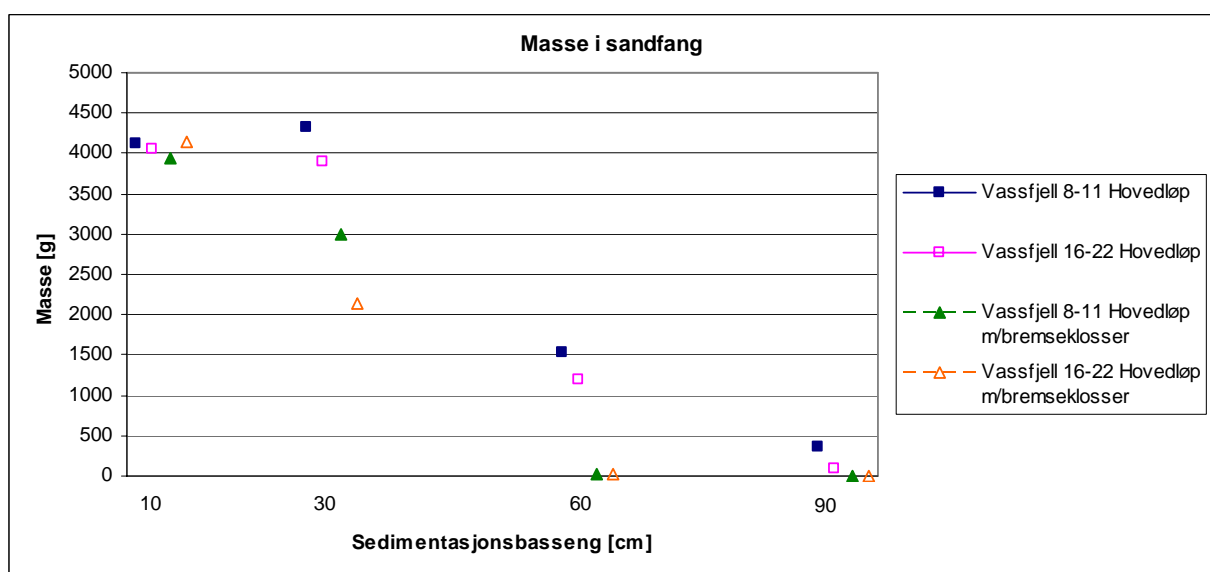
Figur 4-18 Profil av senterlinjen for sentrert hovedløp med og uten bremseklosser

Ved å se på målinger tatt av maksimal og minimal avsetning for hvert forsøk fås resultatene som er vist i Figur 4-19. Målingene er tatt der hvor massen har den lengste utstrekningen og er derfor ikke tatt på samme plass for hvert forsøk. De fleste forsøk uten bruk av bremseklosser har avsetning på fylling. Ved bruk av bremseklosser fås avsetning i og rundt stikkrenne. Unntaket her er 90 cm basseng hvor maksimal avsetning skjer ca. 10 cm før stikkrenne. For de to minste bassengstørrelsene er maksimal og minimal avsetning nokså lik for forsøk med og uten bremseklosser. For de større bassenglengdene får en derimot mer markerte resultater, der forsøk uten bremseklosser avsettes senere og lengre enn forsøk med bremseklosser.



Figur 4-19 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med sentrert hovedløp

For å se på mengde masse som ikke avsettes i sedimentasjonsbasseng er mengde masse i sandfang rapportert og framstilt i Figur 4-20. For korte bassenglengder blir mye av massen fraktet med til sandfanget, mens mengde masse synker ved økende lengder. I tillegg synker mengde masse i sandfang ved bruk av bremseklosser.



Figur 4-20 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp

4.2 Forskjøvet hovedløp

Oppsett med forskjøvet hovedløp har gitt en avsetning som ikke senker kapasiteten til stikkrennen noe betraktelig. Fordelen med et slikt oppsett er at strømningsvegen økes slik at massen får tid til å avsettes før stikkrennen. For lav fylling har noe masse fulgt med vannstrømmen over veggen.



Figur 4-21 Forskjøvet hovedløp med 60 cm basseng. Bildet til venstre viser lav fylling og bildet til høyre viser høy fylling.

Plasseringen av hovedløpet er forskjellig for lav og høy fylling. For lav fylling er hovedløpet forskjøvet 30 cm i forhold til sentrert posisjon, mens det er forskjøvet 65 cm for den høye fyllingen. Plasseringen ved oppsett med 60 cm basseng er vist i Figur 4-21.

Forsøk med forskjøvet hovedløp er utført på bassenglengdene 10 cm, 30 cm og 60 cm. I alle tilfeller har fyllingen i samspill med vannstrømmen fra rennen provosert fram et vannstandssprang. Under forsøk er det observert at vannstandsspranget er likt med vannstandsspranget fått ved bruk av bremseklosser. Ved bruk av bremseklosser har man allikevel fått en raskere og mer kompakt avsetning.

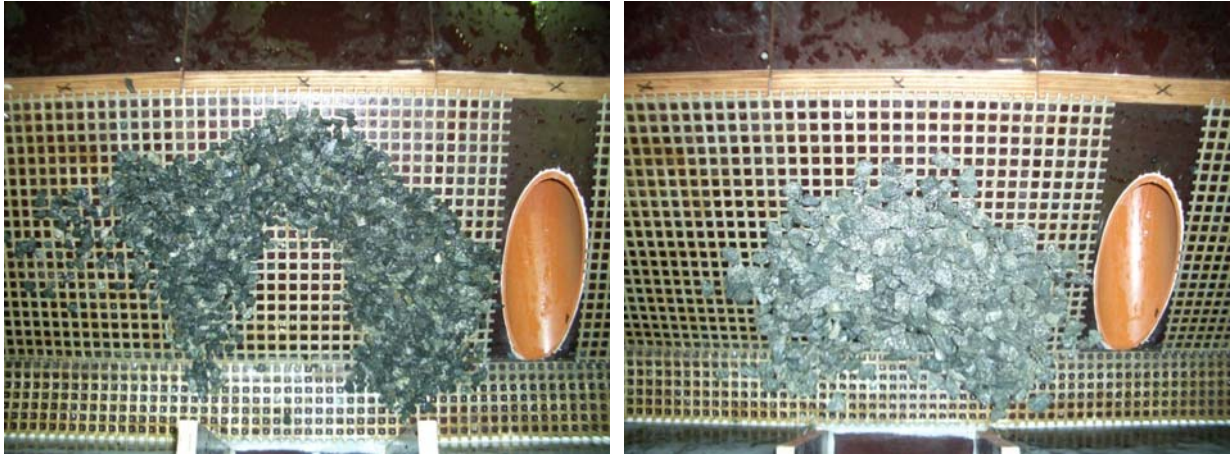
Masse i to ulike fraksjoner ble brukt, Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22. Tendensen har vært at massen med minst fraksjon har gitt mer spredt avsetning i forhold til Vassfjell 16-22 som har gitt mer konsentrert avsetning.

4.2.1 Lav fylling

I alle forsøk utført med lav fylling har fyllingen hindret jetstrøm fra å dannes. Alle forsøk, både med og uten bremseklosser, har dermed hatt en strømningssituasjon med vannstandssprang.

10 cm sedimentasjonsbasseng:

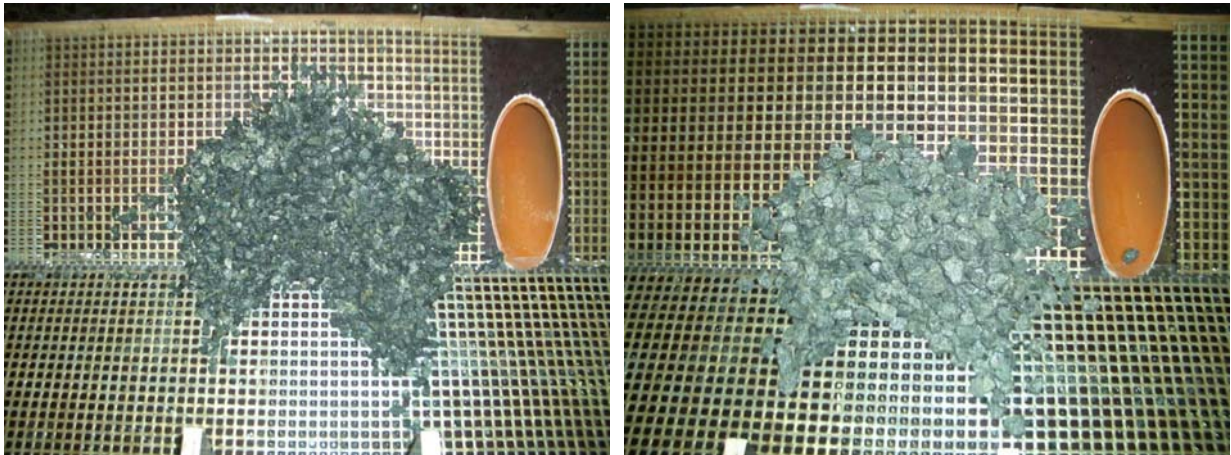
Forsøk utført med 10 cm basseng ga avsetning på fylling, som vist i Figur 4-22. Et slikt oppsett førte til at vannstrømmen fraktet noe av massen over veggen. Under forsøket var det konstant høy vannstand og den endret seg ikke ved tilsetning av masse.



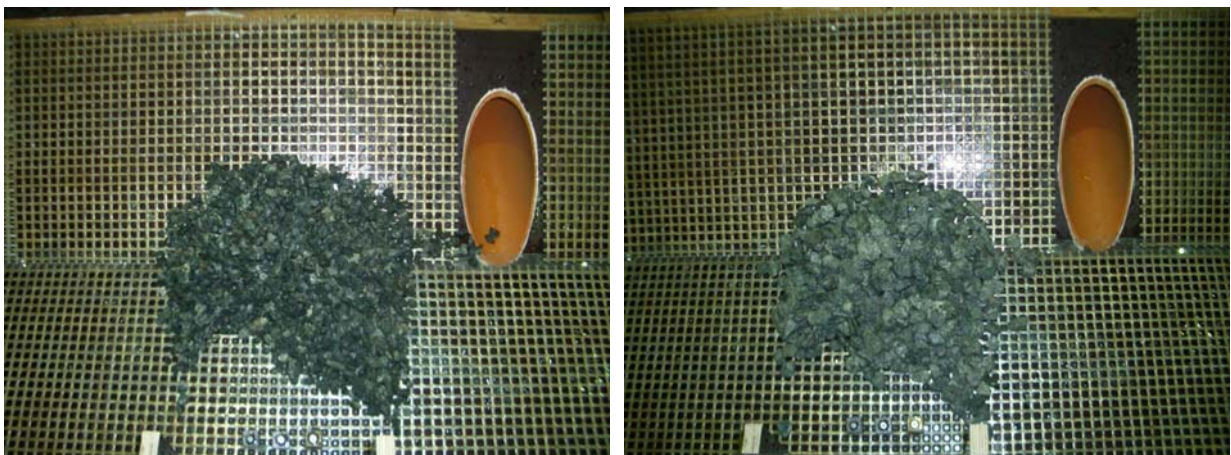
Figur 4-22 Oppsett av 10 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

30 cm sedimentasjonsbasseng:

Som Figur 4-23 viser er avsetningen for et 30 cm basseng noe lavere på fyllingen enn et 10 cm basseng, men avsetningsmønsteret er forholdsvis likt. Under forsøket var det høy vannstand og noe av massen fulgte vannstrømmen over veien. Bremseklosser hadde ingen innvirkning på strømnings situasjon men ga en noe raskere og mer kompakt avsetning enn forsøk utført uten bremseklosser. Se Figur 4-24.



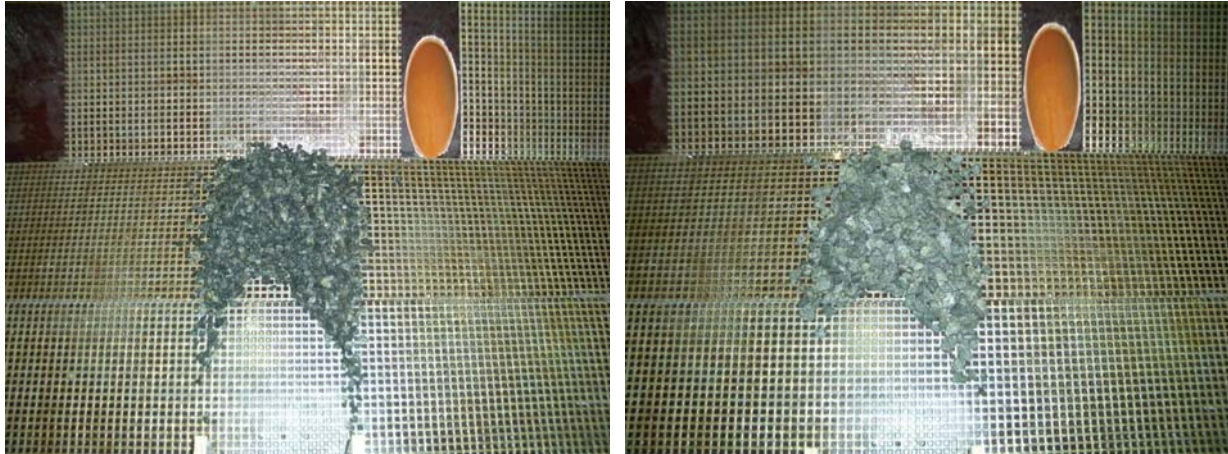
Figur 4-23 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre



Figur 4-24 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

60 cm sedimentasjonsbasseng:

Når bassenglengden øktes til 60 cm ble mesteparten av massen avsatt før fyllingen. Vannstanden var høy, både før og etter tilsetning av masse, og vann strømmet over vegen. Avsetningsmønsteret for forsøk uten bremseklosser er vist i Figur 4-25. Forsøk med bremseklosser ga en raskere avsetning og mer kompakt avsetning.

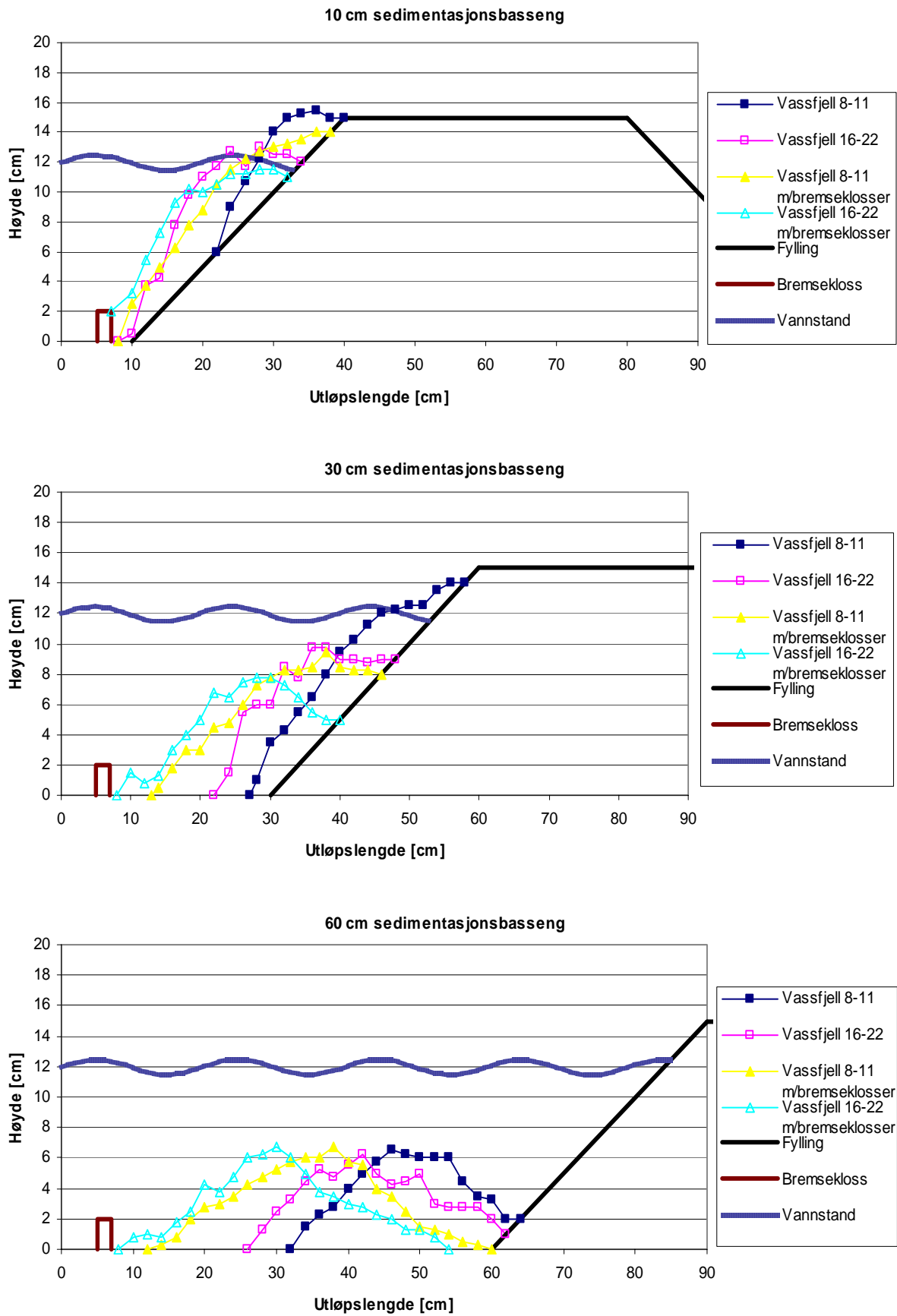


Figur 4-25 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

I forhold til sentrert hovedløp ble atskillig mer masse avsatt for forskjøvet hovedløp. Den vesentligste forskjellen mellom de to forsøksseriene er plasseringen av stikkrennen i forhold til strømningsretningen. I tillegg opererer sentrert hovedløp med både jetstrøm og vannstandssprang i forsøkene mens for forskjøvet hovedløp er alle forsøk utført med vannstandssprang. Sentrert hovedløp har den fordel at mesteparten av massen blir ført bort av jetstrøm, men ulempen er at massene avsettes i og nær innløpet til stikkrennen ved vannstandssprang. For forskjøvet hovedløp blir ikke massen avsatt direkte ved innløpet. Ulempen med dette oppsettet er at for de korteste bassenglengdene som 10 og 30 cm var det en del av massen som fulgte vannstrømmen over vegen. Dermed kan en risikere at material blir avsatt på vegen. I tillegg utøver vannstrømmen mye kraft på selve fyllingen.

Ved å studere profil av forsøk utført med forskjøvet hovedløp, vist i Figur 4-26, ser en hvordan massene avsettes. For 10 og 30 cm basseng avsettes massene langt opp i fyllingen. Spesielt er det Vassfjell 8-11 som har lengst sedimenteringslengde, mens Vassfjell 16-22 avsettes tidlig. I strømningsretningen er det mye vann som strømmet over vegen og massen er dermed blitt dratt med og avsatt langt opp i fyllingen. Noe av massen har også fulgt vannstrømmen over vegen. Vannstanden som er indikert i figuren er basert på gjennomsnittlig vannstand i bassenget og viser ikke reell vannstand på selve senterlinjen.

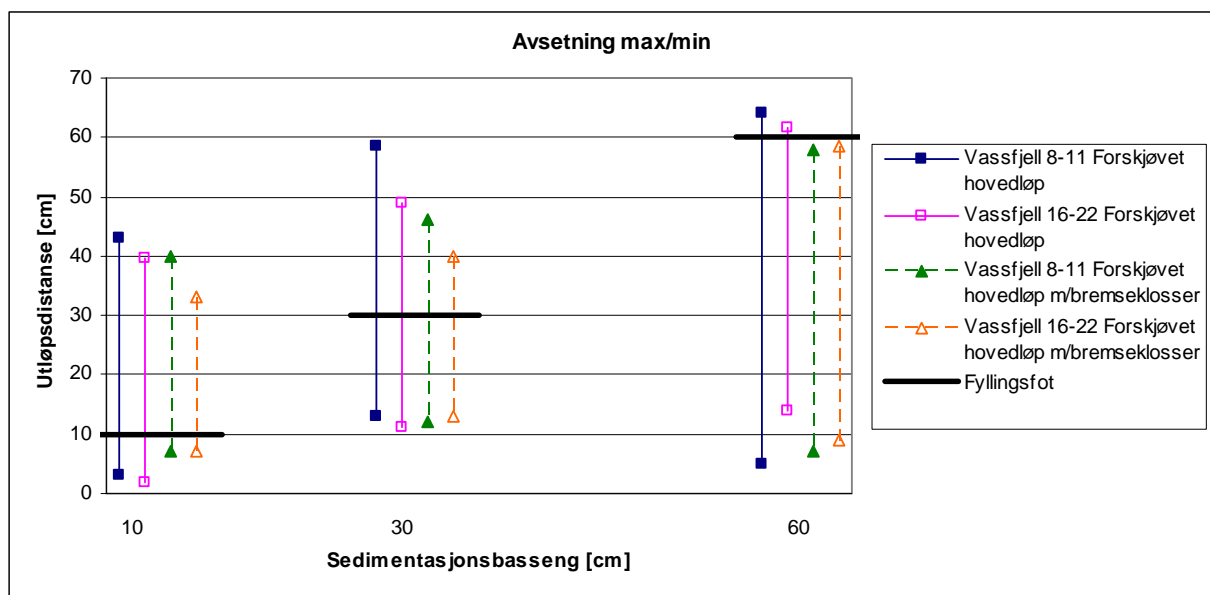
I forsøksserien med forskjøvet hovedløp har en fått avsetning på senterlinjen både med og uten bruk av bremseklosser. Profilene viser tydelig at ved bruk av bremseklosser avsettes massen tidligere.



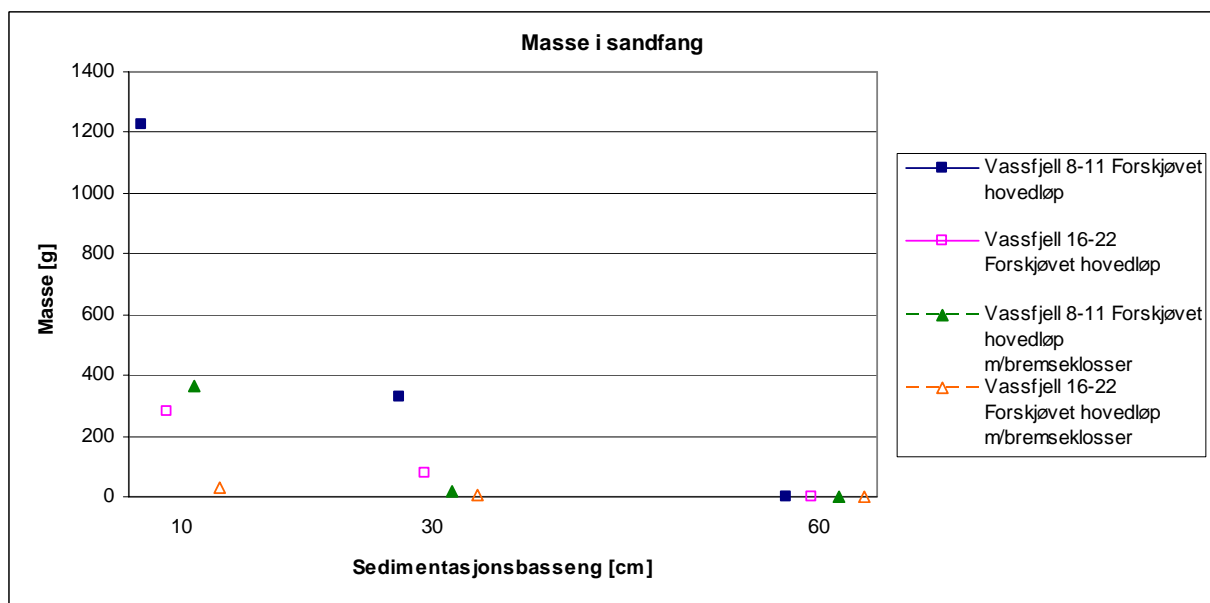
Figur 4-26 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med og uten bremsklosser

Maksimal og minimal sedimentasjonslengde er gjengitt i Figur 4-27. Her ses tendensen om at bruk av bremsklosser gir raskere og mer kompakt avsetning. For de minste sedimentasjonsbassengene, 10 og 30 cm, er mesteparten av massen avsatt på selve fyllingen, mens det for 60 cm bassenget er avsatt i bassenget. I tillegg er avsetningslengden lengre for Vassfjell 8-11 enn for Vassfjell 16-22. Sammenligner en maksimal og minimal sedimentasjonslengde med resultater fått for sentrert hovedløp har forsøk ved bruk av forskjøvet hovedløp en lengre avsetningslengde. Dette har sin sammenheng med mengde material som faktisk avsettes. Ser en på andel masse som ikke er avsatt er denne betydelig høyere for sentrert hovedløp enn for forskjøvet hovedløp.

Mengde masse i sandfang for forskjøvet hovedløp er vist i Figur 4-28, mens resultatene for sentrert hovedløp er gitt i Figur 4-11. For forskjøvet hovedløp er andel masse som havner i sandfanget liten. For 10 cm basseng fås den største andel av masse i sandfang. Dette har sin sammenheng med at en god del av massen fulgte vannstrømmen over veggen og ut i sandfanget. Det blir også mindre masse i sandfang ved bruk av bremsklosser enn uten. Dette viser også resultatene for sentrert hovedløp. For et 60 cm basseng vil all massen avsettes i bassenget.



Figur 4-27 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med forskjøvet hovedløp



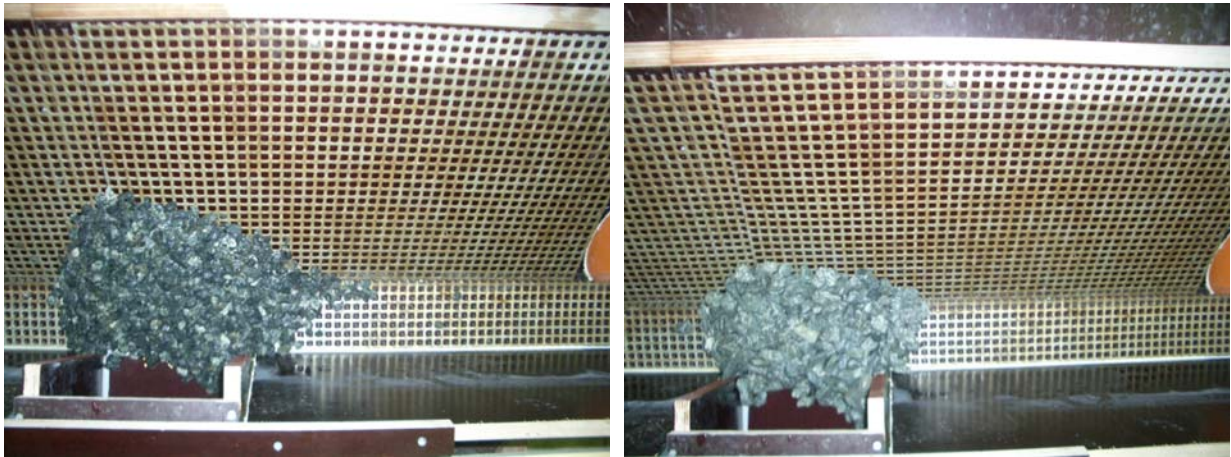
Figur 4-28 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp

4.2.2 Høy fylling

Forsøk utført med forskjøvet hovedløp på høy fylling ga et vannstandssprang både med og uten bremseklosser. Siden stigningen på den høye fyllingen er brattere enn for den lave, har dette medført at vannstandsspranget har forplantet seg lenger bak enn for den lave fyllingen.

10 cm sedimentasjonsbasseng:

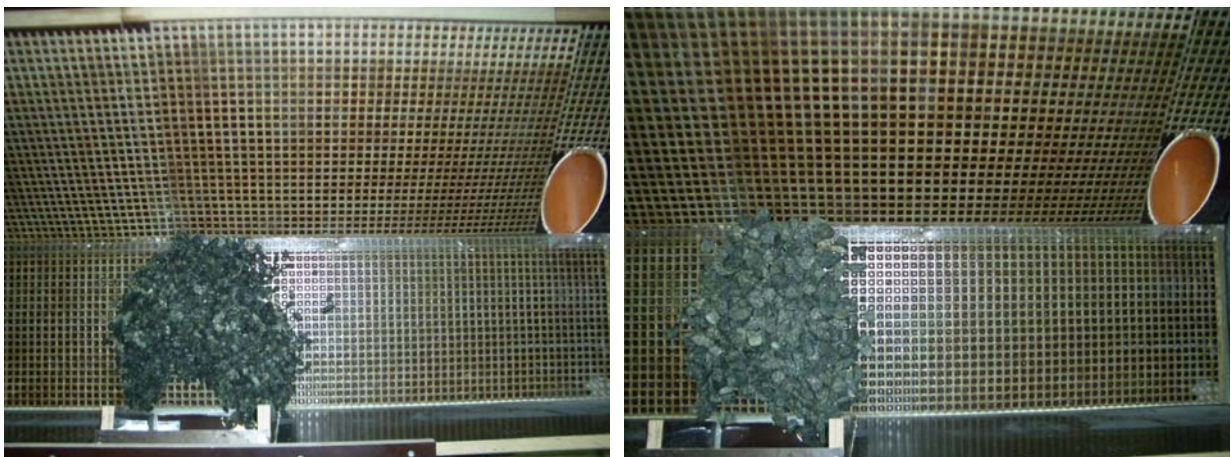
For 10 cm sedimentasjonsbasseng fikk en avsetning på fylling. Forskjellen i avsetningsmønster for forsøk utført med og uten bremseklosser er ikke synlig. Eksempel på avsetning ved bruk av bremseklosser er vist i Figur 4-29. Alt material ble for øvrig avsatt i bassenget. Under forsøket var vannstanden i bassenget høy, men vannet strømmet ikke over fyllingen.



Figur 4-29 Oppsett av 10 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

30 cm sedimentasjonsbasseng:

For 30 cm basseng ble noe av materialet avsatt på fylling, men mesteparten avsattes i selve bassenget. Se Figur 4-30. Under forsøkene var vannstanden høy og ingen endring ble observert etter tilsetning av masse. Det ble ingen variasjon i avsetning ved bruk av bremseklosser.

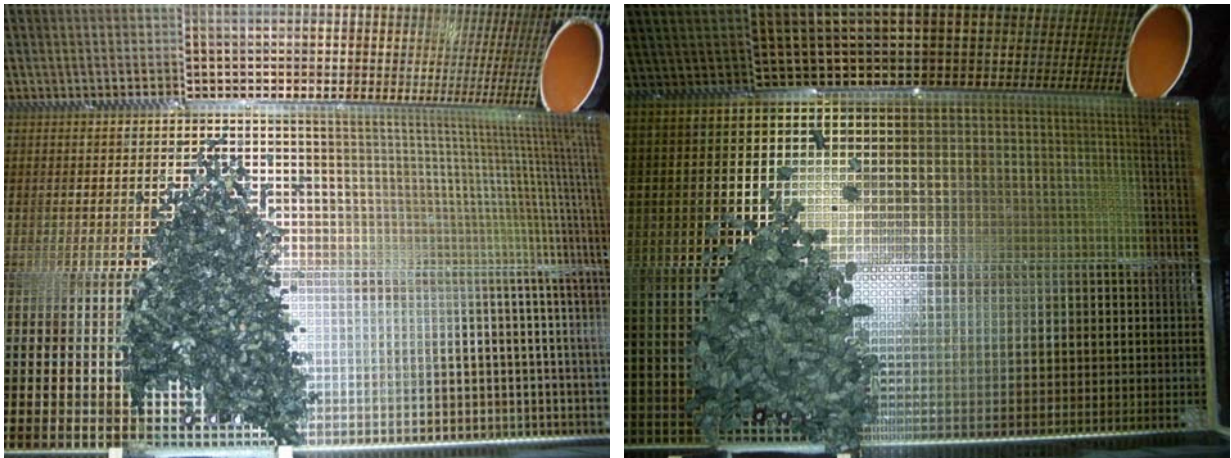


Figur 4-30 Oppsett av 30 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

60 cm sedimentasjonsbasseng:

I motsetning til 10 og 30 cm basseng vil materialet i et 60 cm basseng avsettes før fylling. Avsetningsmønsteret ved bruk av bremseklosser er gitt i Figur 4-31. Det ble heller ikke i disse forsøkene

observert noe tydelig variasjon i avsettingsmønster for forsøk utført med og uten bremseklosser. Et oppsett med sentrert hovedløp, 60 cm basseng og bruk av bremseklosser gir et avsettingsmønster som ligner på den avsettingen som er fremkommet ved bruk av forskjøvet hovedløp. Forskjellen er at massen avsettes raskere for forskjøvet hovedløp.

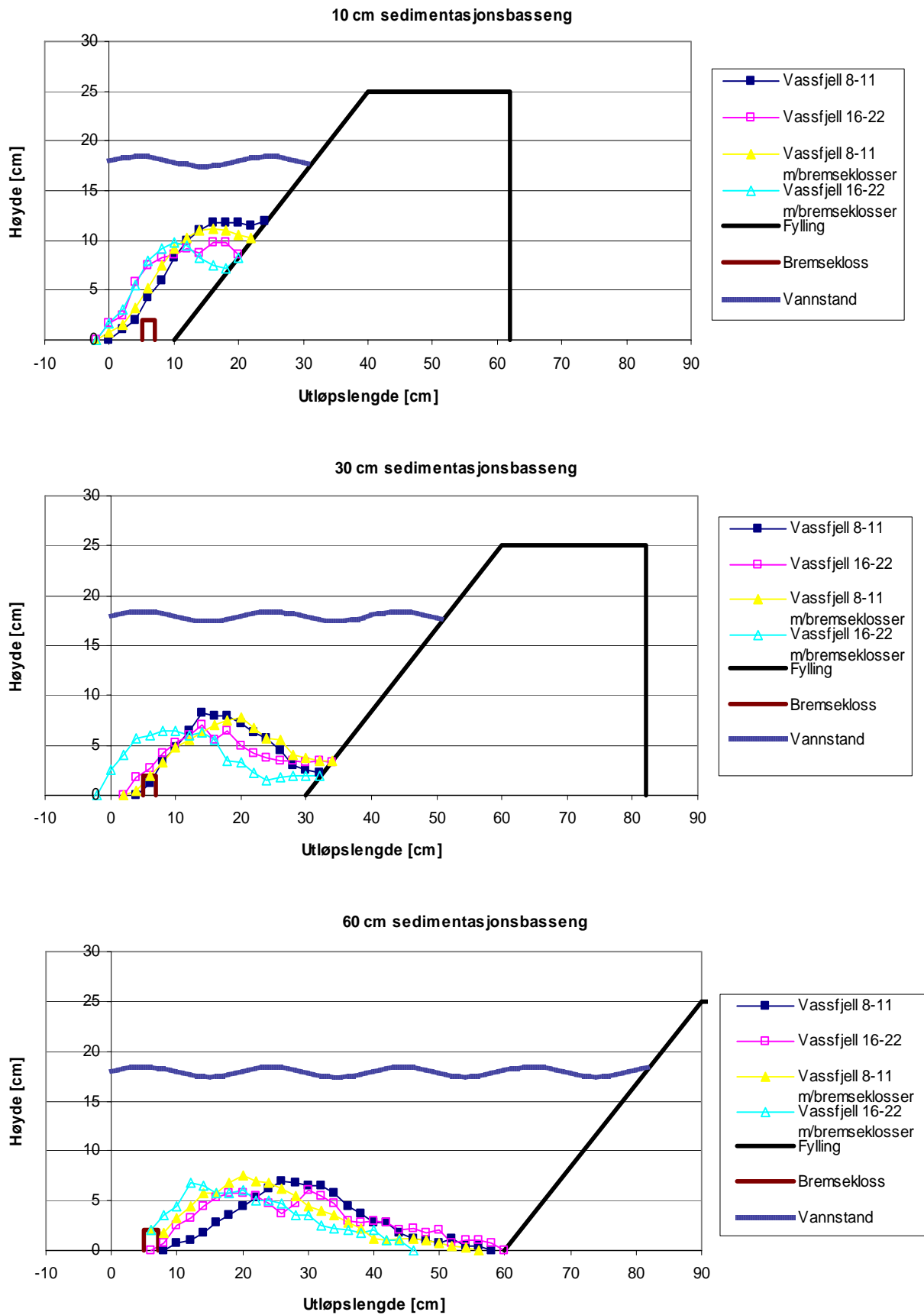


Figur 4-31 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

Vannstanden under de ulike forsøkene er forholdsvis høy. Det vil si at vannspeilet ligger over innløpet til stikkrennen. Vannstanden endret seg ikke ved avsetning av masse. Det er ingen indikasjoner på at materialet blir dratt med vannstrømmen mot stikkrennen for de ulike forsøkene.

Avsetning med og uten bruk av bremseklosser har ikke gitt noen tydelige variasjoner i avsettingsmønsteret. Det tyder også profilene angitt i Figur 4-32 på. Ved å studere profilet av senterlinjen for de ulike bassenglengdene framkommer liten variasjon i avsettingslengde og høyde. For 10 cm og 30 cm sedimentasjonsbasseng har forsøk utført med og uten bremseklosser for Vassfjell 8-11 hatt en forholdsvis lik avsetning. Den samme tendensen har forsøk utført med Vassfjell 16-22 med og uten bremseklosser hatt. For et 60 cm basseng derimot viser tendensen at forsøk utført uten bremseklosser får en lengre sedimentasjonslengde enn forsøk utført med bremseklosser.

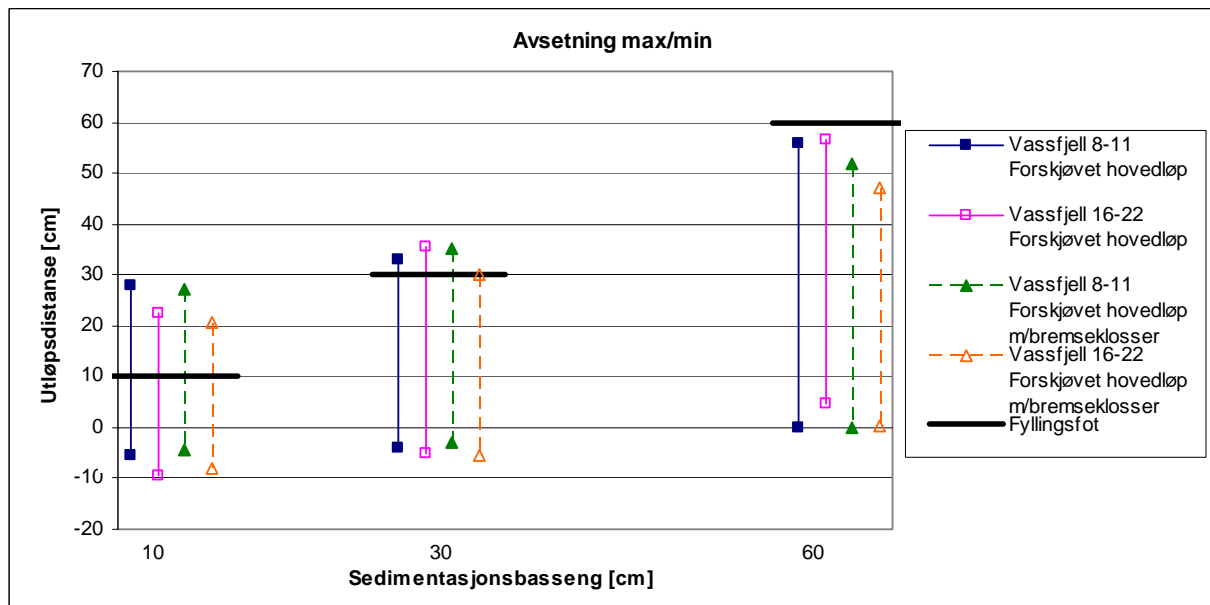
Sammenligner en disse profilene med profil for sentrert hovedløp, Figur 4-18, er det tydelig at forskjøvet hovedløp gir små variasjoner i avsettingsmønster. For sentrert hovedløp er variasjonene mellom forsøk utført med og uten bremseklosser tydelige. Forsøk utført med bremseklosser har en raskere avsetning enn forsøk utført uten bremseklosser. I tillegg er det tydelig at for forskjøvet hovedløp starter avsettingen umiddelbart etter knekk mellom renne og sedimentasjonsbasseng. For 10 cm og 30 cm sedimentasjonsbasseng og ved bruk av bremseklosser har en fått avsetning i selve nedføringsrennen. For sentrert hovedløp tar det lengre tid før massen avsettes.



Figur 4-32 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med og uten bremseklosser

Maksimal og minimal sedimentasjonslengde er gitt i Figur 4-33. Avsetningslengdene er her mer varierende enn det som er registrert for profilet av senterlinjen.

Sammenligner en avsetningslengdene fått for lav fylling er avsetningen her mer kompakt. Dette kan ha sin årsak i at den høye fyllingen er brattere enn den lave fyllingen, noe som har medført at vannstandsspranget har blitt provosert fram tidligere. For eksempel for et 30 cm basseng varierer maksimal sedimentasjonslengde for lav fylling mellom 40 og 60 cm, mens for høy fylling ligger verdiene rundt 35 cm. For 10 og 30 cm basseng har man fått avsetning oppover i rennen. Dette kan være noe av årsaken til at avsetningen er mer kompakt for høy fylling. En tidlig avsetning kan bidra til at vannstandsspranget provoseres fram tidligere. I tillegg fulgte noe av materialet med vannstrømmen over vegen for lav fylling. Materialet ble dermed avsatt lenger opp i fyllingen. For høy fylling strømmet det ikke vann over vegen. All material ble avsatt i bassenget og dermed var det ingen masse i sandfanget.



Figur 4-33 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med forskjøvet hovedløp

4.3 Hovedløp og reserveløp

Et vanlig problem under flomsituasjoner i naturen er at stikkrennen blir tettet igjen av drivgods og vannet finner alternative strømningsveger. Det var dermed ønskelig å undersøke effekten av å sette inn et reserveløp i tillegg til et sentrert hovedløp. På denne måten har man en ekstra sikkerhet i situasjoner hvor et hovedløp kan gå tett. Eksempel på oppsett med hovedløp og reserveløp er vist i Figur 4-34. Reserveløpets plassering er 50 cm fra senterlinjen.



Figur 4-34 Hovedløp og reserveløp for henholdsvis 30 cm og 60 cm basseng.

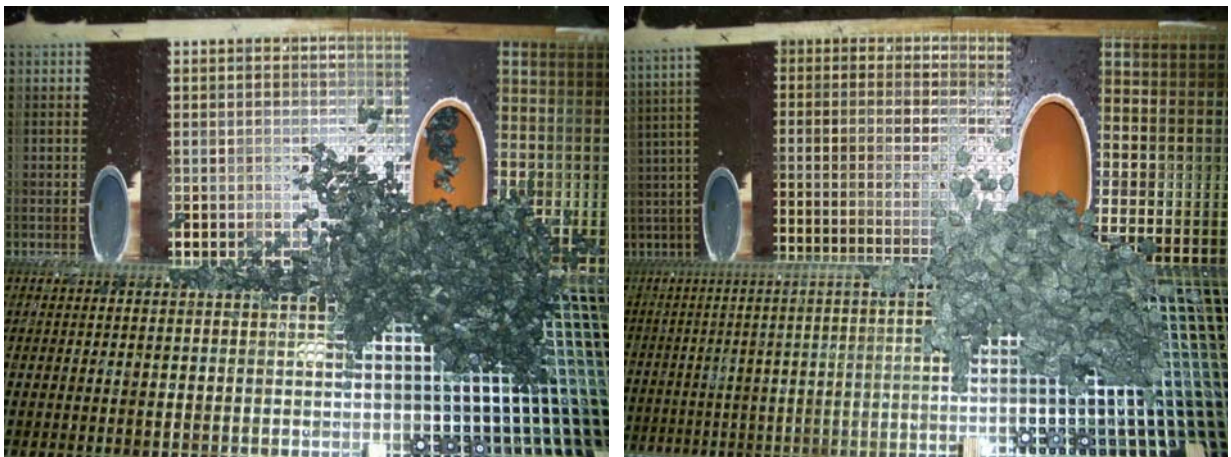
Strømningssituasjonen er lik som for sentrert hovedløp. Uten bruk av bremseklosser fås en jetstrøm som strømmer direkte mot hovedløpet. Ved bruk av bremseklosser blir et vannstandssprang provosert fram. Det er spesielt ved bruk av bremseklosser effekten av et reserveløp kommer fram. Når hovedløpet mister kapasitet, tar reserveløpet unna mye av vannet.

4.3.1 Lav fylling

30 cm sedimentasjonsbasseng:

Det ble utført forsøk med hovedløp og reserveløp for to ulike bassenglengder, 30 cm og 60 cm. For begge bassenglengdene og uten bruk av bremseklosser oppstod det en strømnings situasjon med jetstrøm. Avsetningsmønsteret, for begge tilfeller, er relativt ensartet. Det er lite masse som blir avsatt. Noe masse blir avsatt langs jetstrømmen og rundt innløpet, men mesteparten av massen fulgte jetstrømmen ut gjennom stikkrennen.

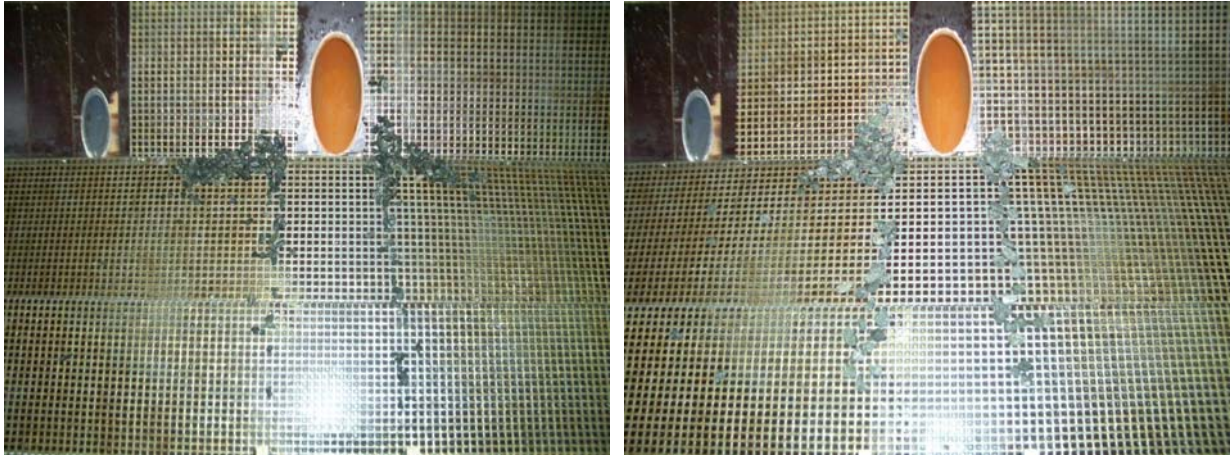
I forsøk med bruk av bremseklosser fås vannstandssprang og dertil mer avsetning. For 30 cm basseng blir massene avsatt i og rundt stikkrennen. Dette ga betydelig kapasitetsreduksjon i det sentrerte hovedløpet. I tillegg økte vannstanden og mengden vann over vegen og reserveløpet brukte all sin kapasitet. Massene trakk seg mot reserveløpet noe som Figur 4-35 illustrerer.



Figur 4-35 Oppsett av 30 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

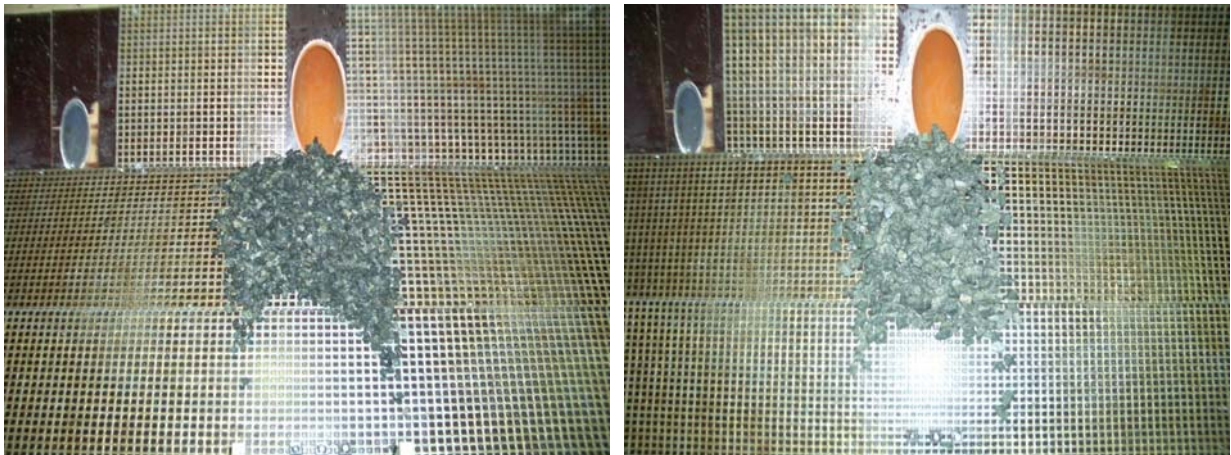
60 cm sedimentasjonsbasseng:

Avsettingen for et 60 cm basseng er vist i Figur 4-36. Her ser en tydelig at masse er avsatt langs jetstrømmen. Avsetningsmønsteret svekket ikke kapasiteten til stikkrennene og vannstanden holdt seg dermed lav.



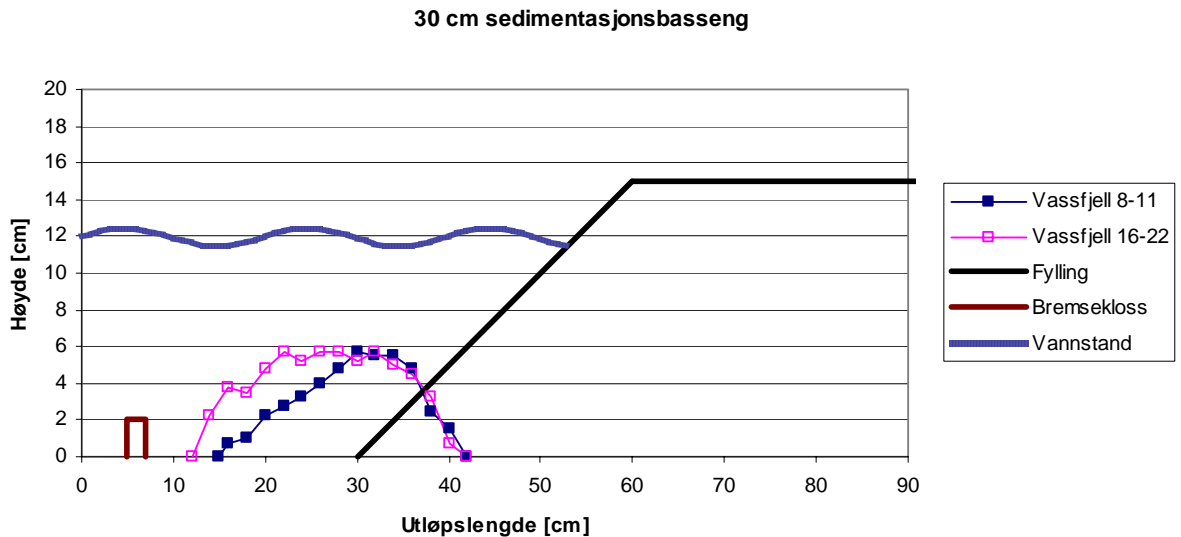
Figur 4-36 Oppsett av 60 cm basseng uten bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

Forsøk utført med bremseklosser på et 60 cm basseng ga avsetting foran innløpet til stikkrennen. Se Figur 4-37. Et slikt avsetningsmønster førte til redusert kapasitet, høyere vannstand i bassenget og reservedøpnet brukte all sin kapasitet.



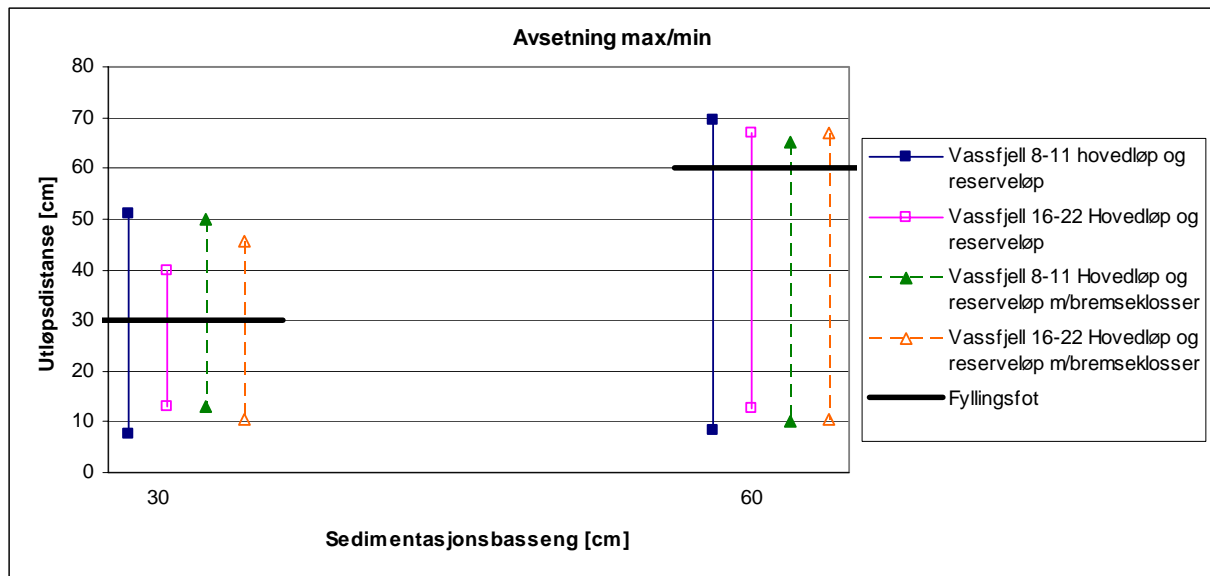
Figur 4-37 Oppsett av 60 cm basseng med bremseklosser. Vassfjell 8-11 i bildet til venstre og Vassfjell 16-22 i bildet til høyre

Profilen for avsetting på senterlinjen er tatt for forsøk utført med bremseklosser og framstilt i Figur 4-38. Begge bassenglengdene har avsetting i stikkrennen. Vassfjell 16-22 avsattes tidligere enn Vassfjell 8-11, men de to materialfraksjonene har nesten lik utløpslengde. For et 30 cm langt sedimentasjonsbasseng fås en avsetting som er mer kompakt enn for 60 cm bassenget.



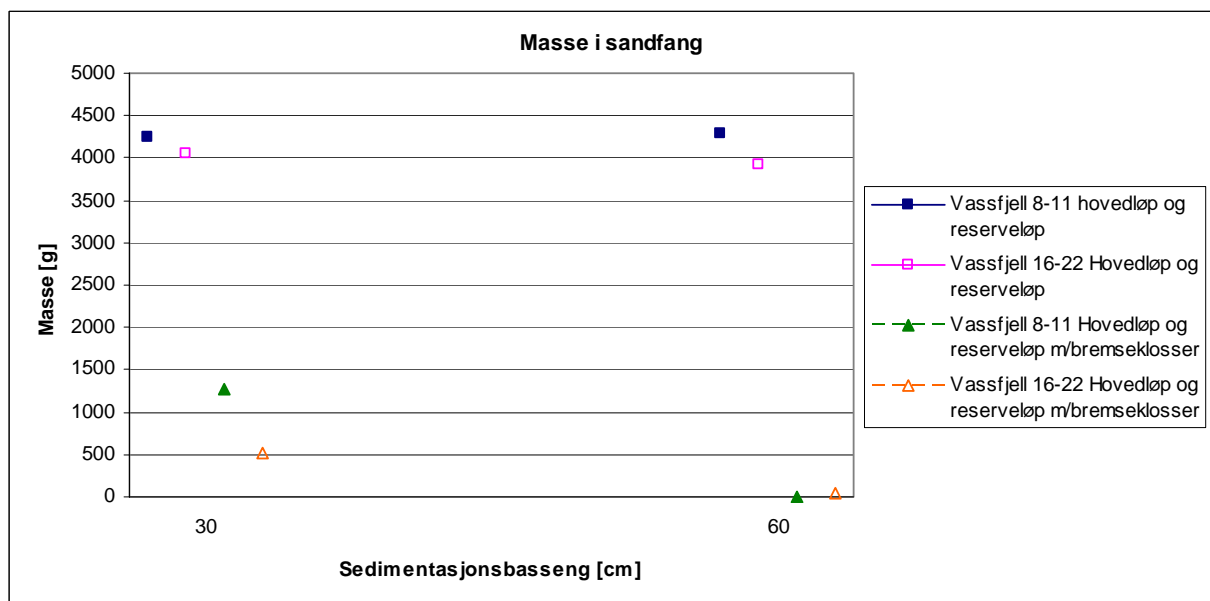
Figur 4-38 Profil av senterlinjen for hovedløp og reserveløp med bremseklosser

Ved å se på maksimal og minimal sedimentasjonslengde fås resultater som vist i Figur 4-39. Forsøk uten bruk av bremseklosser har maksimal avsetning på fylling, mens forsøk utført med bremseklosser har maksimal avsetning i stikkrennen. Bruk av bremseklosser gir en kortere avsetningslengde enn forsøk utført uten bremseklosser.



Figur 4-39 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk med hovedløp og reserveløp

Mengde masse som følger vannstrømmen gjennom stikkrennen og ut i sandfanget er vist i Figur 4-40. Figuren viser at en forholdsvis stor andel masse følger jetstrømmen gjennom stikkrennen. Ved bruk av bremseklosser vil mesteparten av massen bli avsatt før stikkrenne. Det er en liten forskjell mellom Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22. Mer masse av Vassfjell 8-11 blir fraktet med vannstrømmen gjennom stikkrennen.



Figur 4-40 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp

4.4 Oppsummering

Resultatene viser at de ulike forsøkene som er gjennomført har mye til felles. Det er strømningssituasjonen i kombinasjon med lengde av sedimentasjonsbasseng som har størst betydning for avsetning. Strømningssituasjonen innebærer at det under forsøk enten er jetstrøm eller vannstandssprang. Jetstrøm oppstår når det ikke er noen hindringer for vannet i strømningssretningen. For en slik strømningssituasjon blir mesteparten av massen fraktet med strømmen gjennom stikkrennen og ut i sandfanget. Unntaket her er for høy fylling med sedimentasjonsbasseng på 60 og 90 cm hvor mesteparten av massen avsettes i selve bassenget. Vannstandssprang blir framprovosert ved å plassere bremseklos-

ser i strømningsretningen. I tillegg er det oppstått vannstandssprang for oppsett med forskjøvet hovedløp på grunn av at fyllingen reduserer energien til vannstrømmen når vannstrømmen treffer denne. Ved vannstandssprang fås en typisk rask og kompakt avsetning. Ved oppsett med sentrert hovedløp, med og uten reserveløp, har denne raske avsetning ført til delvis blokkering av innløpet til stikkrennen, se Figur 4-5 og Figur 4-35. Dette har svekket kapasiteten til stikkrennen, med påfølgende økning av vannstand. Slik kapasitetsreduksjon er også vanlig når massene avsettes i strømningsretning nær innløpet til stikkrennen.

Avsetningsmønsteret varierer noe med type material som er brukt i de ulike forsøkene. Generelt avsettes den største fraksjonen, Vassfjell 16-22, raskt og konsentrert, mens den mindre fraksjonen, Vassfjell 8-11, har en tendens å avsettes lengre og mer spredt. Ved oppsett med forskjøvet hovedløp og lav fylling ble noe av massen Vassfjell 8-11 fraktet med vannstrømmen over vegen. Vassfjell 16-22 ble i dette tilfellet avsatt før fyllingstopp. Resultatene viser også at det er Vassfjell 8-11 som er lettest å fraktes med. Mengde masse i sandfang er for de fleste tilfeller høyere for Vassfjell 8-11 enn Vassfjell 16-22.

Avsetningsmønsteret for lav og høy fylling varierer. Høy fylling med en helning på 1:1,2 er brattere enn den lave fyllingen med helning 1:2. Denne helningsforskjellen har forårsaket at vannstandsspranget er provosert fram tidligere for høy fylling. Dette er illustrert i Figur 4-41 for samme type oppsett med lav og høy fylling. Som Figur 4-41 viser blir vannstandsspranget for lav fylling først provosert fram når vannstrømmen treffer bremseklossene. For høy fylling derimot oppstår vannstandsspranget i selve nedføringsrennen. Dette gir en noe raskere og mer kompakt avsetning.



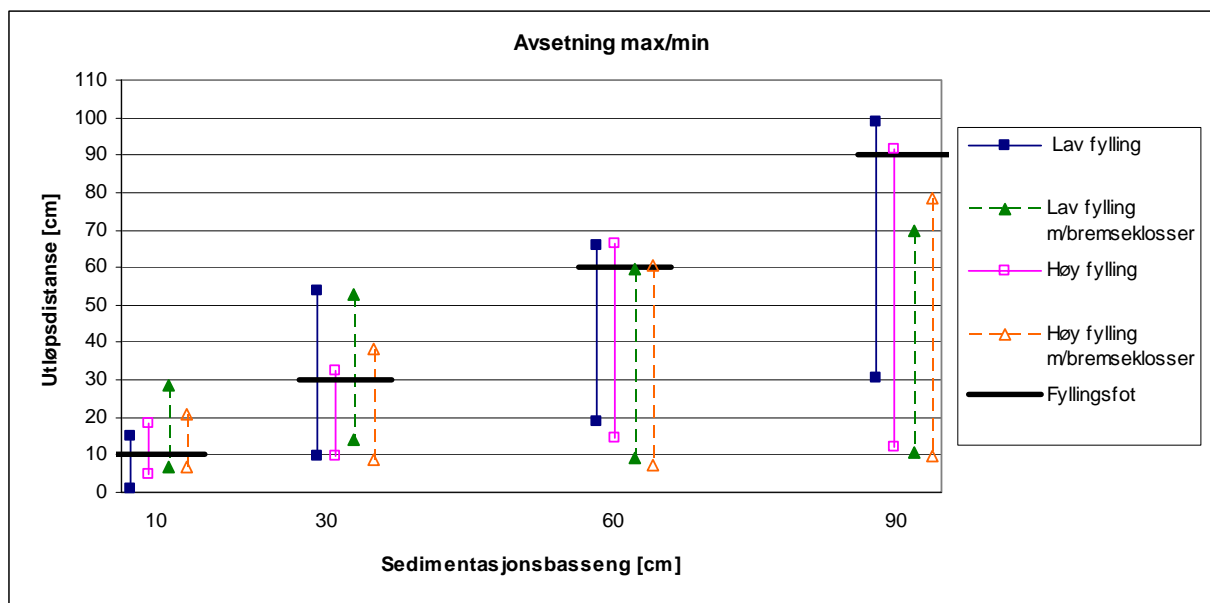
Figur 4-41 Vannstandssprang under forsøk med sentrert hovedløp, 30 cm sedimentasjonsbasseng og bruk av bremseklosser. Lav fylling til venstre og høy fylling til høyre

I forsøk utført uten vannstandssprang vil også avsetningen for henholdsvis lav og høy fylling være ulik. For høy fylling er andel masse avsatt i selve bassenget høy. Spesielt er variasjonen høy for de lengre sedimentasjonsbassengene, som 60 og 90 cm. Årsaken til dette er at gjennomsnittlig vannstand for høy fylling er høyere enn for lav. Dette har ført til at mer masse er avsatt.

Sentrert hovedløp:

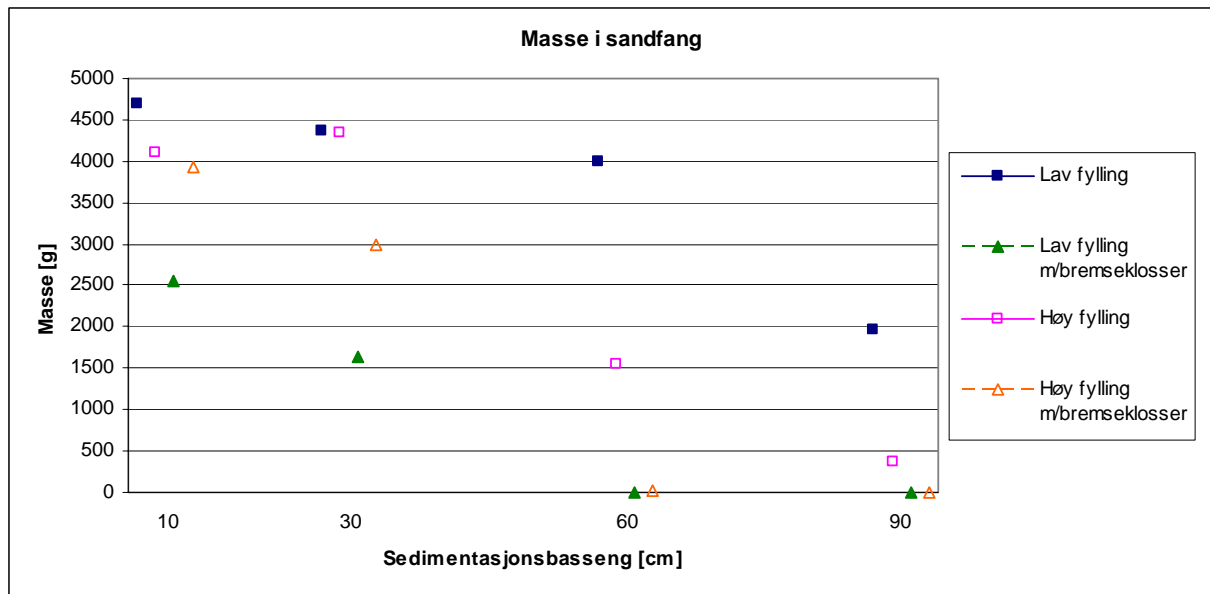
I Figur 4-42 er maksimal og minimal sedimentasjonslengde for Vassfjell 8-11, både lav og høy fylling, vist. Uten bruk av bremseklosser vil det i de fleste tilfeller avsettes materiale på selve fyllingen. For 10, 30 og 60 cm sedimentasjonsbasseng blir mesteparten av massen ført med jetstrømmen gjennom stikkrennen. Resten av massen blir avsatt på selve fyllingen. Resultatene for maksimalverdiene i figuren angir dermed avsetning på fylling. For 90 cm sedimentasjonsbasseng derimot blir Vassfjell 8-11 avsatt i stikkrennen for både lav og høy fylling. I tillegg gir høy fylling avsetning i stikkrennen for både Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22 for 60 cm sedimentasjonsbasseng. Ut fra figuren viser tendensen at det er lav fylling som har den lengste sedimentasjonslengden, mens høy fylling har raskere avsetning.

Ved bruk av bremseklosser avsettes mesteparten av massen i bassenget, med unntak av 10 cm sedimentasjonsbasseng hvor mesteparten av massen følger strømmen gjennom stikkrennen. For 30 cm og 60 cm sedimentasjonsbasseng avsettes massen ved innløpet og i selve stikkrennen. Dette har gitt kapasitetsreduksjon, med tilhørende økning av vannstanden, for forsøk utført med både lav og høy fylling. I Figur 4-42 vises tydelig at for spesielt 30 cm basseng har massen satt seg 9 cm og 23 cm inn i stikkrennen, for henholdsvis høy og lav fylling. For 90 cm sedimentasjonsbasseng avsettes massen før innløpet til stikkrennen. En slik avsetning påvirker kapasiteten og vannstanden i mindre grad. Som for forsøk utført uten bremseklosser vil den lengste sedimentasjonslengden oppstå i de fleste tilfeller for lav fylling, mens den korteste sedimentasjonslengden fås for høy fylling.



Figur 4-42 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk utført med sentrert hovedløp og Vassfjell 8-11

Andel masse som ikke er avsatt er vist i Figur 4-43. Figuren viser klart at mindre masse blir avsatt for lav fylling enn for høy, uten bruk av bremseklosser. Forskjellen mellom lav og høy fylling er størst ved 60 og 90 cm sedimentasjonsbasseng. Mengde masse fraktet gjennom stikkrennen sank ved bruk av bremseklosser. Her ble mest masse avsatt for lav fylling for 10 og 30 cm sedimentasjonsbasseng. For 60 og 90 cm sedimentasjonsbasseng avsattes all masse i bassenget.

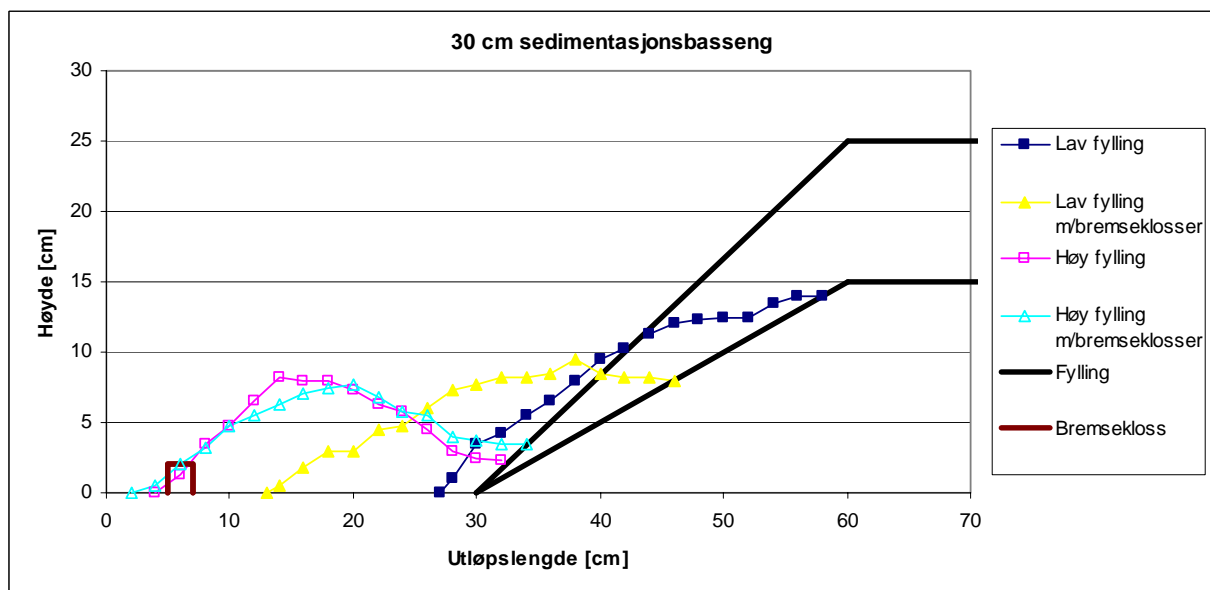


Figur 4-43 Andel masse i sandfang for sentrert hovedløp og Vassfjell 8-11

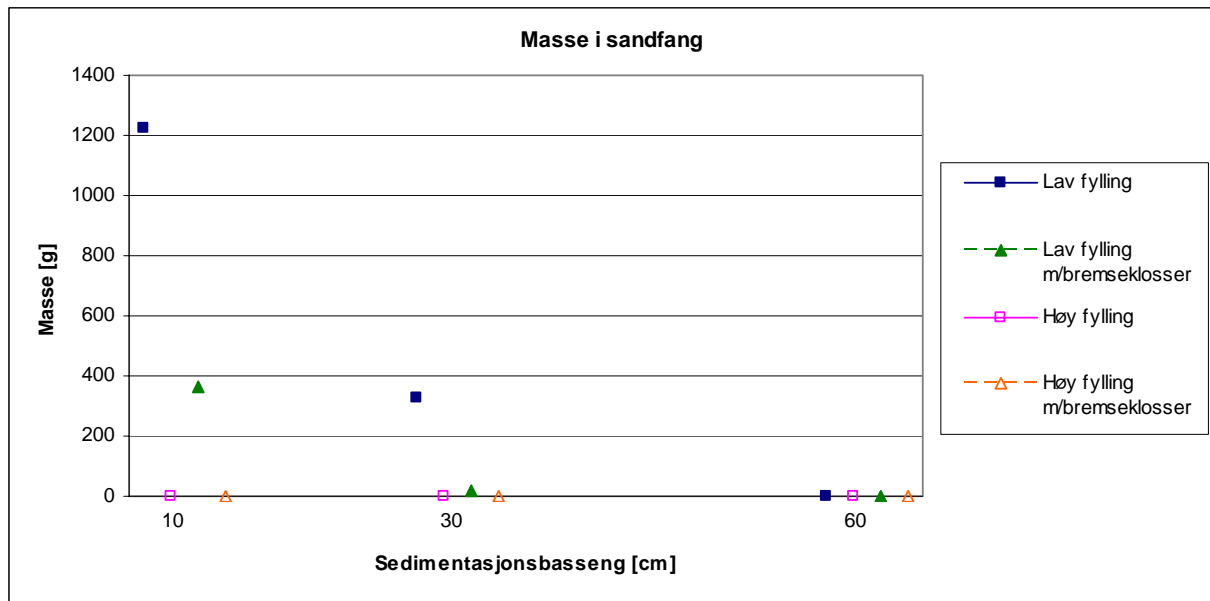
Forskjøvet hovedløp:

For forskjøvet hovedløp oppstod mer variasjon i avsetning mellom lav og høy fylling. Profilet for lav og høy fylling, med et 30 cm sedimentasjonsbasseng, er vist i Figur 4-44. Figuren viser tydelig at avsetningen for høy fylling er raskere og mer kompakt enn avsetningen for lav fylling. Årsaken til dette er stigningen på fyllingen. Ved lav fylling strømmet vann over veggen og massene ble derfor avsatt lenger opp i fyllingen enn høy fylling. Noe masse fulgte også denne vannstrømmen over fyllingen. Dette henseiles i Figur 4-45 hvor andel masse som ikke er avsatt i bassenget er registrert. Det er kun for lav fylling en har fått masse i sandfang. For høy fylling ble all masse avsatt i bassenget.

Profilet viser at det er stor forskjell i avsetning for lav fylling med og uten bremseklosser, men små variasjoner for høy fylling. For lav fylling ble det raskere avsetning ved bruk av bremseklosser, mens sedimentasjonslengden for materialet ble lengre uten bruk av disse.

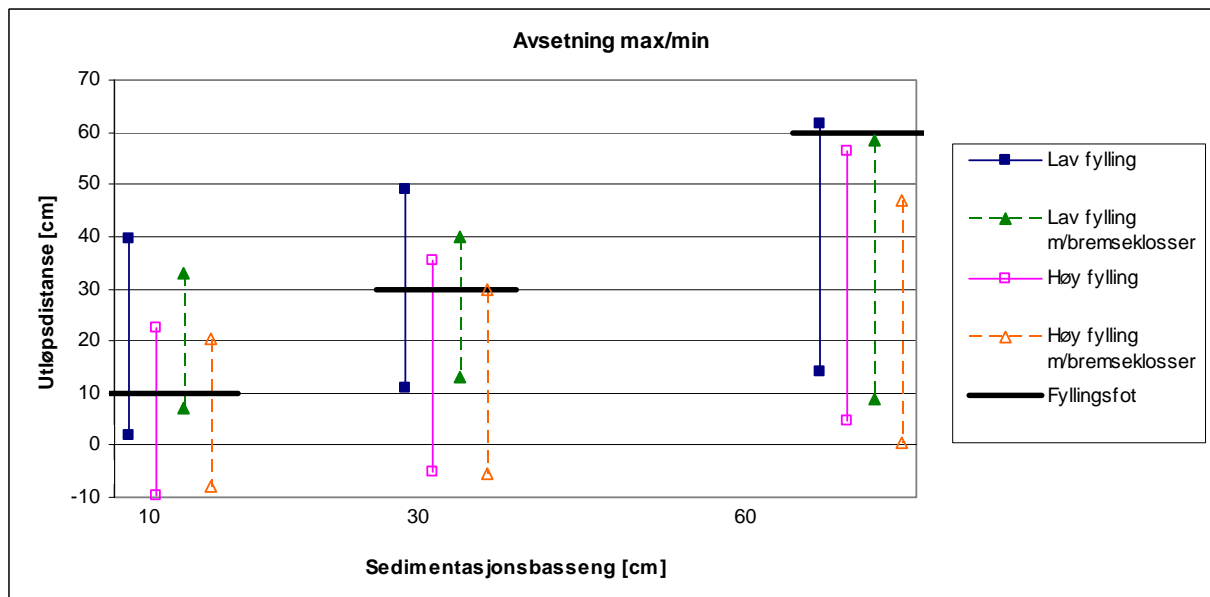


Figur 4-44 Profil av senterlinjen for forskjøvet hovedløp med masse Vassfjell 8-11 med og uten bremseklosser



Figur 4-45 Andel masse i sandfang for forskjøvet hovedløp og Vassfjell 8-11

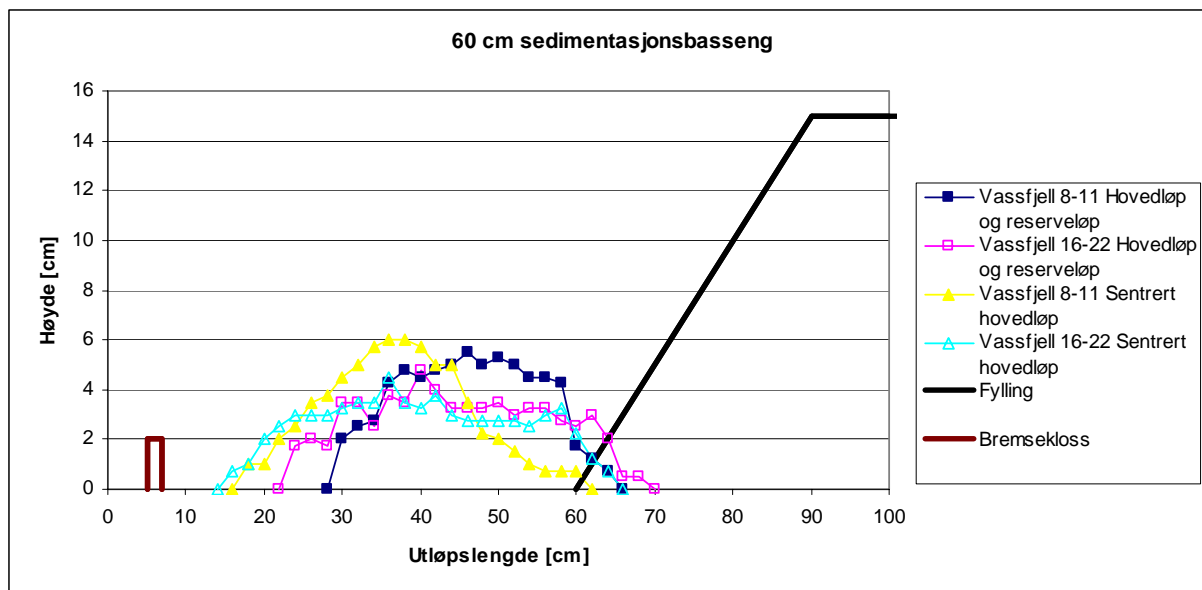
Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for høy og lav fylling og material Vassfjell 16-22 er vist i Figur 4-46. Figuren viser tydelig variasjon mellom avsetningslengden for lav og høy fylling. Lav fylling gir lengre sedimentasjonslengde enn høy fylling, mens massen avsettes raskere ved høy fylling enn lav fylling. Både 10 og 30 cm sedimentasjonsbasseng har avsetning på fyllingen. Ved bruk av bremsklosser får en i de fleste tilfeller raskere sedimentasjon.



Figur 4-46 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for forsøk utført med forskjøvet hovedløp og Vassfjell 16-22

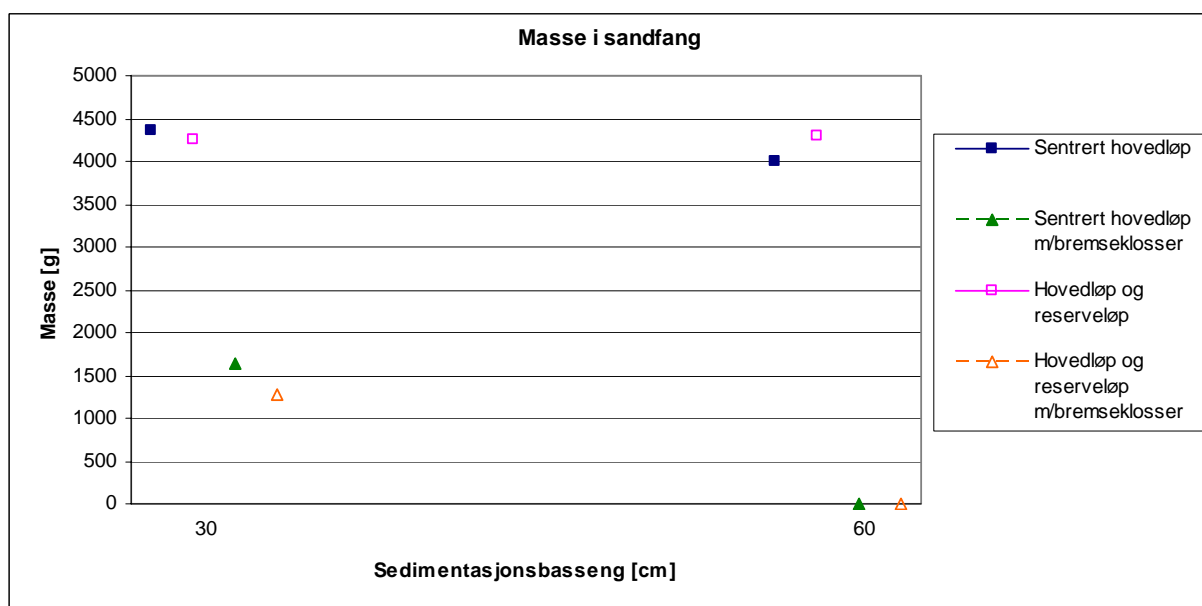
Hovedløp og reserveløp:

Et oppsett med hovedløp og reserveløp ga et forholdsvis likt avsetningsmønster som for sentrert hovedløp. Forskjellen er at avsetningen for hovedløp og reserveløp er mer forskjøvet, med lengre maksimal sedimentasjonslengde, enn for forsøk utført med sentrert hovedløp. Eksempel på avsetningsmønster for begge oppsett er vist i Figur 4-47 for 60 cm sedimentasjonsbasseng.



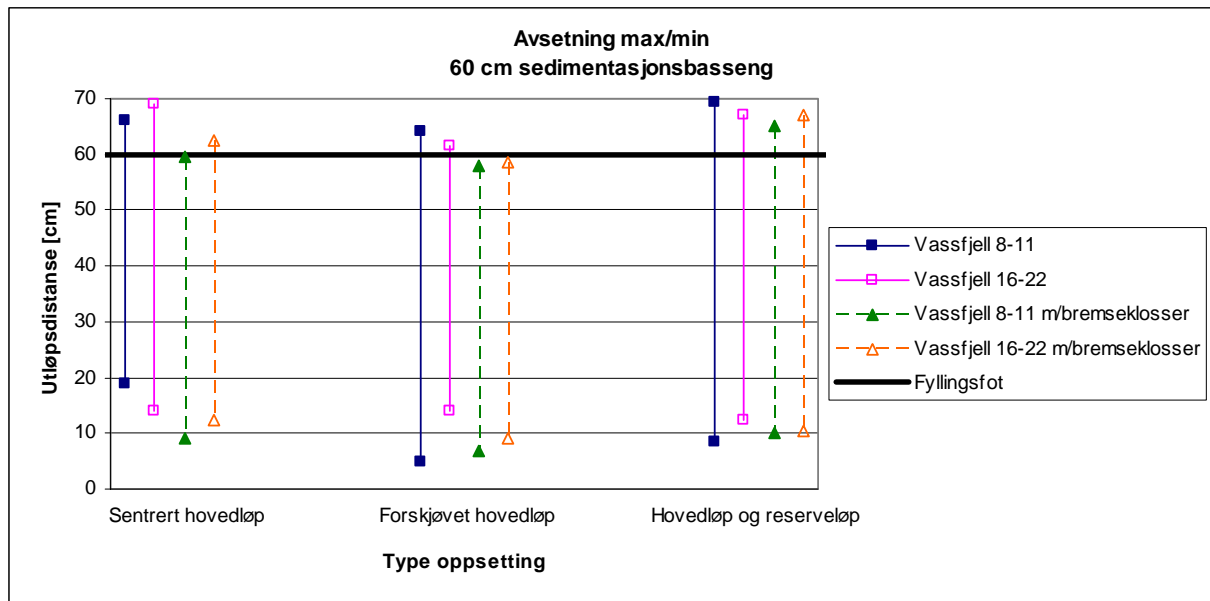
Figur 4-47 Profil av senterlinjen for "hovedløp og reserveløp" og "sentrert hovedløp" med bremseklosser

Andel masse som blir fraktet med av vannstrømmen gjennom stikkrennen er vist i Figur 4-48. For 30 cm sedimentasjonsbasseng får en at mer masse blir avsatt ved bruk av reserveløp. For 60 cm sedimentasjonsbasseng får en det motsatte at mer masse blir fraktet gjennom stikkrennen ved bruk av reserveløp.



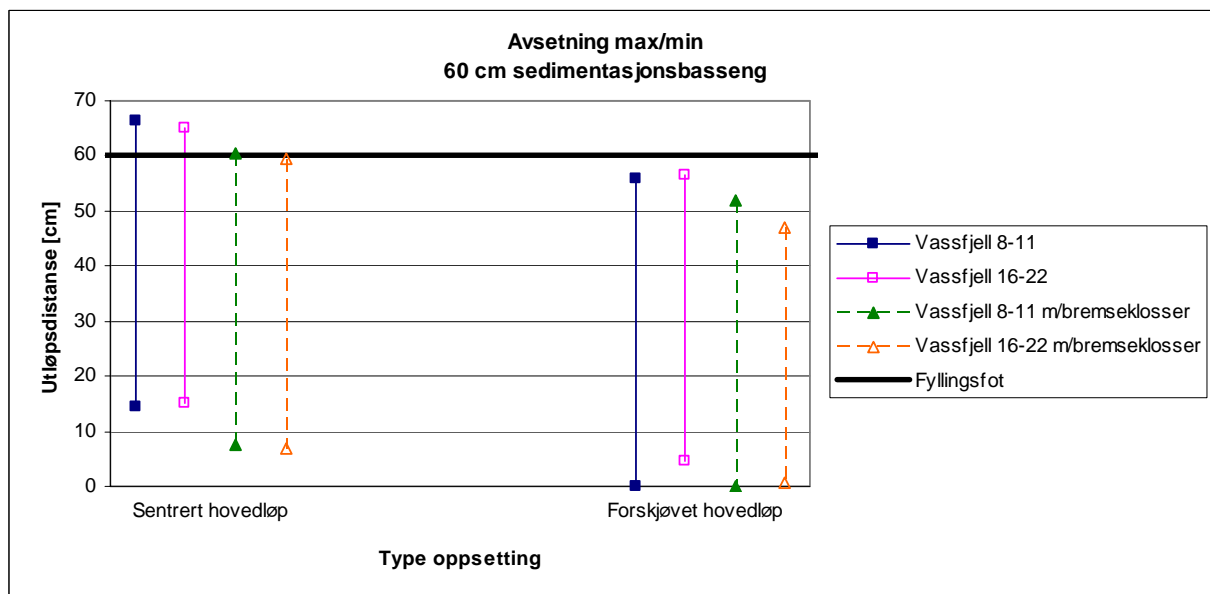
Figur 4-48 Andel masse i sandfang for "hovedløp og reserveløp" og "sentrert hovedløp" og Vassfjell 8-11

Ved å sammenligne de ulike oppsettene for lav fylling og 60 cm sedimentasjonsbasseng fås maksimal og minimal avsetningslengde som gitt i Figur 4-49. Uten bruk av bremseklosser fås avsetning på fylling. Ved bruk av bremseklosser avsettes massen i selve stikkrennen, med unntak for forskjøvet hovedløp. Vassfjell 8-11 sedimenteres raskere enn Vassfjell 16-22, med unntak av sentrert hovedløp, og har i tillegg lengre sedimentasjonslengde



Figur 4-49 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for lav fylling med 60 cm sedimentasjonsbasseng

For høy fylling er maksimal og minimal sedimentasjonslengde for 60 cm sedimentasjonsbasseng ved ulike oppsett vist i Figur 4-50. Til forskjell fra lav fylling avsettes mesteparten av massen før fyllingsfot. Dette gjelder ikke for sentrert hovedløp uten bremseklosser, der massen avsettes på fyllingen. Forsøk utført med bremseklosser ga kortere avsetningslengde enn forsøk utført uten bremseklosser. Det er også forskjell i avsetning mellom de to ulike materialene. Vassfjell 16-22 har kortere avsetning både med og uten bruk av bremseklosser.



Figur 4-50 Maksimal og minimal sedimentasjonslengde for høy fylling med 60 cm sedimentasjonsbasseng

4.5 Feilkilder

Ved hjelp av modellovene, kapittel 3.2, har en kommet fram til de viktigste fysiske størrelsene som kan overføres fra modell til natur og som dermed ligger til grunn for modellforsøket. På bakgrunn av dette har en fått proporsjonalitet mellom natur og modell. Det er allikevel en del usikkerhet knyttet til selve modellforsøket som utførelse, dokumentasjon og utstyr, som ikke blir behandlet av modellovene.

I modellforsøkene er det valgt å bruke ensgradert material av type Vassfjell i fraksjonen 8-11 mm og 16-22 mm. Disse to fraksjonene gjenspeiler ikke den virkelige fordelingen av material som finnes i natur. I natur blir velgraderte materialsammensetninger og drivgods, som trær, kvister, gress og jord, transportert under større flomvannføringer. Massetransport i natur er dermed mer komplisert og mindre forutsigbart enn for modellforsøkene som er optimaliserte og forenklet. I natur kan man for eksempel oppleve at trær og kvister setter seg på tvers i inntaket. Dette vil kunne øke oppfangning av annet drivgods og material og dermed kan man risikere å få full blokkering av innløpet. Derimot har modellforsøkene kun tatt for seg bunnlast og resultatene har gitt klare indikasjoner på hvordan massen avsettes for de ulike forsøkene. Dermed kan materialet som er brukt til en viss grad være representativ for den bunnlasten som finnes i naturen.

Vannføringen under forsøk er beregnet ut fra Mannings formel. Det er stor usikkerhet rundt verdien på Mannings tallet (M). Mannings formel er følsom, ved at små variasjoner i Mannings tallet gir store utslag i beregninger. Det er derfor viktig at størrelsen på tallet stemmer noenlunde overens med det som framtrer under forsøk. I beregningene ble det antatt at $M = 50$ for rennen og $M = 100$ for stikkrennen. For å undersøke om Mannings tall stemmer for rennen ble vannhøyden i rennen målt. Vannhøyden var tilnærmet lik den som var brukt i beregningene og dermed kan man konkludere med at Mannings tallet er tilnærmet korrekt. Stikkrennens ruhet ble kontrollert ved å regne ut kapasiteten til stikkrennen. Stikkrennen hadde teoretisk nok kapasitet til å ta unna den vannføringen som ble brukt under forsøk. Dette samsvarer med observasjonene gjort under forsøk. Det valgte Manningstallet er dermed forholdsvis rett. Kontrollregningene indikerte at de valgte Manningstallene er rett og det kan dermed antas at beregningene som er gjort er innen rimelighetens grenser i forhold til avvik fra den virkelige situasjonen i modellen.

Modellen er laget i vannfast kryssfiner, noe som gir minimal friksjon. For å øke friksjonen ble det lagt inn perforerte plater, med 8 mm hulrom, i sedimentasjonsbassenget og på tilstøtende fylling. For å få en høy nok vannhastighet i rennen ble ikke disse platene brukt her. Bruk av disse perforerte platene har gitt friksjon og ført til at materiale er avsatt. Problemet som har oppstått under forsøk har vært at enkelte partikler har satt seg fast i hulrommene. Det er brukt separate plater i sedimentasjonsbassenget og på fyllingen. Dette har ført til at noe material har satt seg fast i overgangen mellom bassenget og fyllingen. Visuelt har dette hatt lite å si for avsetningen. Alle forsøk er utført to ganger for å sikre repetibarheten. Avsetningen avviker lite i de parvise forsøkene hvor en i det ene tilfellet har hatt mer masse som har satt seg i overgang mellom perforerte plater, mens det neste har hatt minimal avsetning her.

I overgangen mellom glatt renne og til den perforerte platen i sedimentasjonsbassenget har vannstrømmen gitt en strømningssituasjon med jetstrøm. Overgangen mellom lite friksjon og mye friksjon har dermed hatt lite å si for strømningssituasjonen.

Ved tilsetning av masse under forsøket har utstyret gitt begrensinger. Vibratormaskinen har ikke hatt kapasitet til å tilsette nok masse i forhold til det som er utregnet ved hjelp av Peter-Meyers bunnlastformel, kapittel 2.3.3. Konsentrasjonen som er på 0,25 kg/s er mindre i forhold til utregnet verdi på 0,41 kg/s og 0,31 kg/s for henholdsvis partikkelstørrelser på 0,01 m og 0,02 m. Dette kan ha noe å si på avsetningsmønsteret. Hadde blandingsforholdet mellom vann og materialet vært høyere ville en kanskje ha fått noe annerledes avsetning.

De ulike forsøkene som er utført har ingen fast varighet. Vannet blir skrudd på til det oppnår en konstant vannføring på 0,0076 m³/s. Etter at vannet har nådd en stabil strømningssituasjon i sedimentasjonsbassenget blir massen tilført. Tidsbruken på disse ulike momentene varierer for hvert forsøk og dermed er det ikke satt en tidsramme for forsøkene. Dette fører igjen til at varigheten med vanntilførsel etter at massen er avsatt kan variere. En slik variasjon kan gi utslag i avsetningsmønsteret.

Etter at massen er tilsatt blir vanntilførselen stoppet momentant. I naturen vil dette foregå mer gradvis. Når vannet skrus brått av oppstår det en "tømmeeffekt" i bassenget som gir et ekstra dragsug. Dette dragsug har i enkelte tilfeller dratt med seg materialer. Avsetningen blir dermed ikke helt korrekt.

Dokumentasjon av forsøkene inneholder visse usikkerhetsmomenter. Alle målinger er utført manuelt ved bruk av tommestokk. Verdiene er avrundet til hver 0,5 cm. Det gir en feilmargin på $\pm 2,5$ mm.

Mengde materialet som ble tilsatt hvert forsøk var ca. 4,9 kg. Alt material som ble avsatt i bassenget og fraktet til sandfanget ble veid opp for hvert forsøk. Avviket mellom den mengde material som ble tilsatt og det som ble veid opp som avsatt var ofte sprikende. Dette har sin årsak i at material setter seg fast i den perforerte platen og det er vanskelig å få samlet all material for hvert forsøk. I tillegg medfører oppfangning av material fra sandfang at vann følger med i varierende grad.

Hvilken rolle de ulike usikkerhetsmomentene har spilt for avsetningsmønsteret er vanskelig å si. I større eller mindre grad vil det nok avvike fra virkeligheten, men resultatene som er oppnådd under de ulike modellforsøkene har gitt gode indikasjoner på hvordan en kan forvente at avsetningen blir.

5 Drøfting og erfaringer

Utgangspunktet for modellforsøket var å undersøke hvordan massetransport og sedimentasjon påvirkes av ulike oppsett. De ulike faktorene som er studert kan oppsummeres til:

- plassering av stikkrenne
- grøftebredde
- bruk av energidreper
- fyllingshøyde

Ved hjelp av de praktiske forsøkene var det ønskelig å komme fram til gode løsninger for utforming for å hindre at massen avsattes i og ved innløpet til stikkrennen. Helt eller delvis gjentetting av stikkrenner kan gi uheldige konsekvenser ved at vannet må finne alternative strømningsveger, gjerne med det utfall at fyllingen blir utvasket og bæreevnen svekket. I tillegg til at innløpsområdet bør plasseres slik at massen ikke samler seg i og ved inntaket, bør massetransporten over veggen være minimal. Massetransport over veggen kan innebære trafikkfarlige situasjoner for trafikanter. Avsettes massen på veggen kan dette være farlig ved påkjørsel. Forsøkene har vist at mengde masse som transporteres over veggen eller avsettes her avhenger av fyllingshøyde og helning. Under forsøkene ble masse transportert over lav fylling, men ikke over høy fylling. I mange tilfeller ble massen liggende igjen på veggen til den lave fyllingen. Dette er ikke en ønsket situasjon.

Ved utforming av innløpsområdet må sikkerheten til trafikantene også legges til grunn. En eventuell utforkjøring skal ikke føre til alvorlige ulykker. Utforming av innløpsområdet ut fra trafiksikkerhetsmessige hensyn er ikke vurdert i denne oppgaven. Trafiksikkerhet er en viktig del av trafikantens hverdag og behov for rekkverk skal derfor kort omtales her.

I modellforsøket har en brukt en innløpsutforming som er formet etter helningen på fyllingen. Dette er en utforming som innebærer risiko ved utforkjøring og dermed krever bruk av rekkverk. Sammenligner en innløpstypen med andre typer utforminger, som utstikkende rørende eller bruk av frontmur ca. vinkelrett på rørets lengdeakse, er dette det mest trafiksikre. (SVV, 2005) Innløpet har ingen utstikkende parti eller rask helningsendring.

I modellforsøket er det kjørt forsøk på to typer fyllinger. Den lave fyllingen har en helning 1:2 og en fyllingshøyde på 15 cm, noe som tilsvarer 3 m i virkeligheten. I Tabell 5-1 er største tillatte fyllingshøyde ved helning 1:2 gitt. I henhold til tabellen er det dermed forsvarlig å ikke bruke rekkverk for fartsgrense opptil 80 km/t, med unntak av en trafikkmengde på over 10 000 kjøretøy per døgn. Den høye fyllingen har en helning på 1:1,2. Ifølge Rekkverksnormalen (SVV, 2003) er denne helningen likeverdig med stup. Fyllingshøyden er 25 cm eller 5 m i oppskalert virkelig størrelse og tilfredsstillende ikke kravene gitt i Tabell 5-2. Høy fylling og lav fylling med fartsgrense 90 km/t og høyere, samt fartsgrense 70 og 80 km/t med ÅDT > 10 000 krever dermed bruk av rekkverk. Rekkverk er et faremoment i seg selv og bør unngås ved for eksempel å fylle opp sideterrenget for å unngå høye og bratte fyllinger eller flate ut helningen på fyllingen. Trafiksikkerhetsmessig er det den lave fyllingen som kommer best ut.

Tabell 5-1 Største tillatte fyllingshøyde uten rekkverk ved fall 1:2 (SVV, 2003)

ÅDT	Fyllingshøyde			
	Helning på fyllingen	Fartsgrense 60 km/t og lavere	Fartsgrense 70 og 80 km/t	Fartsgrense 90 km/t og høyere
0 – 5 000	1:2	5 m	3 m	2 m
5 000 – 10 000	1:2	4 m	3 m	1,5 m
> 10 000	1:2	3 m	2 m	1,5 m

Tabell 5-2 Største tillatte fyllingshøyde uten rekkverk ved fall brattere enn 1:1,5 (stup) (SVV, 2003)

<i>Fyllingshøyde</i>	
Fartsgrense 60 km/t og lavere	Fartsgrense 70 km/t og høyere
1,5 m	1,0 m

Den teoretisk beregnede sedimentasjonslengden, X_C , utregnet i Tabell 3-9 gir en sedimentasjonslengde på 84 cm for Vassfjell 8-11 og 59 cm for Vassfjell 16-22. Sammenligner en disse verdiene med de målte avsetningslengdene i modellforsøkene, varierer de målte verdien i stor grad med ulike oppsett. Denne variasjonen skyldes at fyllingen, plassering av stikkrenne og bruk av bremseklosser spiller en stor rolle i strømningssituasjonen ved at det forårsaker energireduksjon i vannstrømmen. En slik energireduksjon fører til raskere avsetning av masse. I tillegg er det en del usikkerhet knyttet til strømningssituasjon med jetstrøm. Jetstrømmen er kraftig og for oppsett med sentrert hovedløp er det mye masse som blir fraktet direkte gjennom stikkrennen. Det er kun maksimal sedimentasjonslengde i bassenget som er registrert og det er derfor ikke tatt hensyn til material som er fraktet gjennom stikkrennen med jetstrømmen. For alle typer oppsett, med unntak av sentrert hovedløp med 90 cm sedimentasjonsbasseng, avsettes massen innen en lengde på 70 cm. For sentrert hovedløp og 90 cm sedimentasjonsbasseng blir massen avsatt mellom 80 og 100 cm. Forklaringen på dette er at fyllingen er såpass langt unna at energitapet i vannstrømmen er mindre. I de fleste forsøk blir Vassfjell 8-11 avsatt lengst, men variasjonene mellom de to fraksjonene er små.

For å hindre gjentetting av innløpet er det viktig å sikre at massen enten blir avsatt før innløpet eller blir fraktet gjennom stikkrennen. Begge disse strategiene varierer med strømningssituasjonen. I tilfeller der en har vannstandssprang blir massen avsatt og det er lengden på sedimentasjonsbassenget eller plassering av stikkrenne som avgjør om innløpet blir berørt. I forsøk utført med forskjøvet hovedløp har en ikke fått avsetning i innløpet. Ved jetstrøm blir massen fraktet gjennom stikkrennen for oppsett med plassering av stikkrenne i strømningssretningen og sedimentasjonsbasseng kortere enn 90 cm.

Sentrert hovedløp har vist seg å være sårbart med hensyn til gjentetting. Ved bruk av bremseklosser har massen blitt avsatt i og foran stikkrennen for sedimentasjonsbasseng på 30 og 60 cm. For 10 cm har massen blitt fraktet gjennom stikkrennen og for 90 cm er massen avsatt før stikkrennen. Uten bruk av bremseklosser har vannstrømmen fraktet bort massen, med unntak av 90 cm sedimentasjonsbasseng hvor mesteparten av massen ble avsatt ved innløpet. Jetstrømmen har dermed vist seg å være den mest effektive strategien for sentrert hovedløp i modellforsøket. I naturen derimot er det veldig usikkert å basere seg på en strategi med jetstrøm. Hvis partikler som for eksempel større steiner, kvister og trær setter seg fast nederst i en nedføringsrenne så kan vannstandssprang bli provosert fram og massen avsatt. Dermed har en liten kontroll på avsetningen og en kan risikere at stikkrennen blir tettet.

For oppsett med hovedløp og reserveløp vil en ha samme problemstilling som for sentrert hovedløp. Oppsettet er sårbart for gjentetting, men har den fordel at reserveløpet kan ta unna noe av vannmengden når hovedløpet mister kapasitet. Et slikt oppsett har vist seg å fungere bra. Ved bruk av bremseklosser har massen blitt avsatt ved innløpet, mens mesteparten av massen blir fraktet bort uten bruk av disse. Som for sentrert hovedløp er strømningssituasjon med jetstrøm sårbart hvis større partikler avsettes og provoserer fram vannstandssprang.

Ulempen med å plassere hovedløpet i strømningssretningen er at det er sårbart for gjentetting både med og uten bruk av bremseklosser. Et slikt oppsett krever derfor mye vedlikehold for å være driftssikker og funksjonell. Bruk av reserveløp har den fordel at det gir ekstra kapasitet og sikkerhet hvis en plutselig gjentetting skulle opptre. I forsøk utført med reserveløp ble massene dratt mot dette. Erfaringer viser at en forflytning av reserveløpet på minimum 50 cm fra senterlinjen må tilfredsstilles for at reserveløpet skal opprettholde sin funksjon.

Ved å forskyve stikkrennen i forhold til senterlinjen blir massen avsatt i strømningssretningen. Dermed slipper man at massen direkte tetter igjen stikkrennen. For lav fylling er stikkrennen plassert 30 cm ut fra senterlinjen, mens for høy fylling er den plassert 65 cm ut fra senterlinjen. Under forsøkene har avsetningens utbredelse ikke vært i nærheten av inntaket til stikkrennen. Stikkrennen har derfor opp-

rettholdt kapasiteten gjennom forsøkene. Ut fra visuelle undersøkelser av avsetting har massen ikke hatt noen tendens til å dras mot stikkrennen. Ut fra de resultater som foreligger vil en avstand fra senterlinjen på 30 cm være tilstrekkelig for å hindre gjentetting. Ulempen med en slik plassering har vært at for forsøk utført med lav fylling har masse blitt transportert over fyllingen. I tillegg er det verdt å merke at det ikke kjennes til de kreftene som vannstrømmen påvirker fyllingen med. For å hindre utgraving av fyllingen må en i praksis anlegge en kraftig plastring på fylling i strømningsretningen.

6 Feltarbeid i Sandeid, Vindafjord kommune

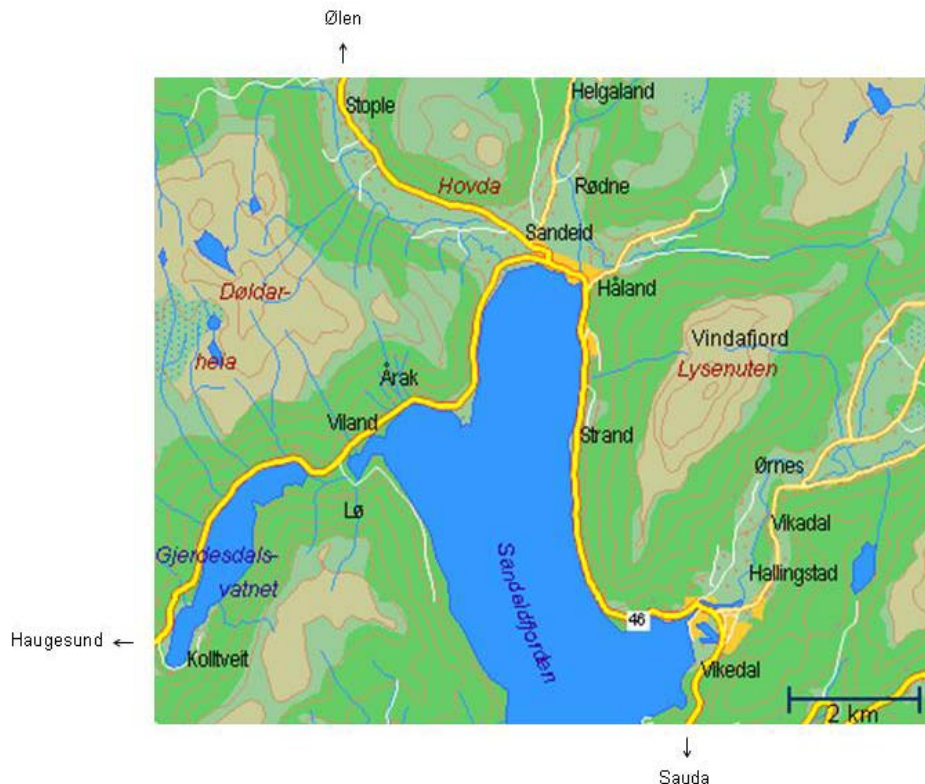
Større flomvannføringer fører ofte med seg problemer i form av erosjon og massetransport. Høsten 2004 har det vært flere situasjoner på Vestlandet hvor stikkrenner har gått tett på grunn av massetransport. En slik gjentetting fører til at vann og masse må finne alternative strømningsveger og en kan dermed risikere store skader på vegnettet og at masse transporteres ut på vegen. Slike flomsituasjoner går ut over trafiksikkerheten til trafikantene og kan ha konsekvenser for liv og eiendom. I tillegg svekkes regulariteten i vegnettet og opprydding fører til høye driftskostnader.

Sandeid, i Vindafjord kommune, er et område som har hatt problemer med massetransport under ekstreme værforhold. Sensommeren 2004 ble området rammet av kraftig og intens nedbør. I løpet av få timer vokste bekkene og gravde nye løp, og store vannmasser med sand, grus og drivgods blokkerte avløp og skyllet ut over veg og boligområder. Riksveg 46 ble stengt og skadeomfanget på natur, infrastruktur og eiendommer var høyt. Med bakgrunn i denne flommen er det foretatt befarings på stedet. Fem utvalgte bekkeløp ble studert og forslag til forbedringer ble utarbeidet. Hensikten med feltarbeidet var å få redusert konsekvensene ved en eventuell ny flom og forebygge problemer som massetransport fører med seg. Det viktigste var å utforme innløpsområdet til stikkrennen for å hindre gjentetting av dette. I tillegg er bruk av ulike preventive tiltak mot erosjon og sedimentasjon blitt vurdert.

Feltarbeidet er utført som en befarings der egne observasjoner og bruk av lokalkunnskap og erfaring fra drift- og vedlikeholdsmannskap har vært viktig.

6.1 Analyse av området

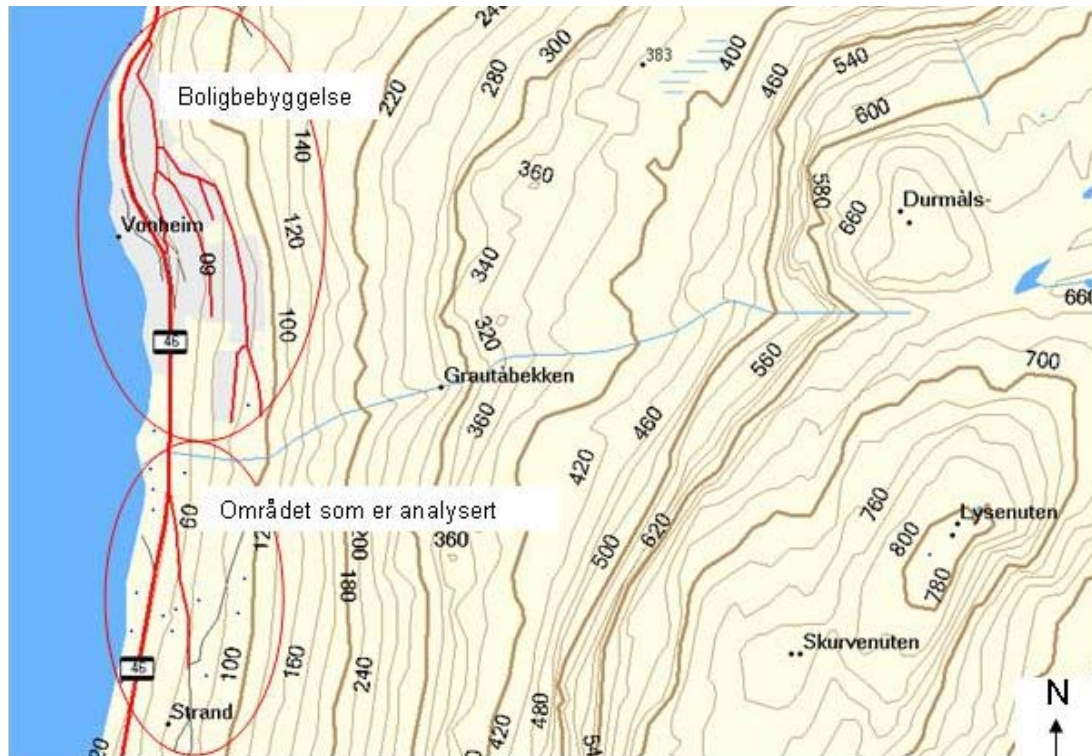
Sandeid er kommunesenter i Vindafjord kommune i Nord-Rogaland. Sandeid ligger innerst i Sandeidfjorden og er omsluttet av fjell, vist i Figur 6-1.



Figur 6-1 Kart over Sandeid med omkringliggende områder

Området er preget av et variert kulturlandskap, med mye jordbruksarealer, skogsressurser og beiteområder. Det meste av jordsmonnet i Sandeid er morenemasser.

Området som er analysert ligger ca. 2 km sør fra Sandeid sentrum og er avgrenset av Grautåbekken i nord og Strand i sør som vist i Figur 6-2. Dette området ligger i foten av Lysenuten, et 812 meter høyt fjell. Fjellsidene er bratte og terrenget er kombinert beite- og skogsområder.



Figur 6-2 Oversikt over området som er analysert

Gjennom Sandeid går riksveg 46. Dette er en viktig ferdssåre, både for lokal transport og som bindeledd mellom store deler av Haugalandet og Indre Ryfylke. Avkjørselen til Strand er en kommunal veg.

Det er området oppstrøms og nedstrøms riksvegen som er analysert. Nedenfor riksvegen er det spredt bebyggelse og disse eiendommene ligger utsatt til ved flom.

6.1.1 Flom i Sandeid

Natt til 20. august 2004 førte et intenst regnskylt til flom med påfølgende skader på 14 millioner kroner. De registrerte skadene er fordelt på:

Utvendige skader (Naturskadefondet)	6,5 mill. kr.
Innvendige skader (Forsikringsselskap)	6,0 mill. kr.
Kommunale anlegg	1,5 mill. kr.

(Skaar, 2005)

Flommen inntraff i området øst for Sandeidfjorden, vist i Figur 6-3.



Figur 6-3 Oversikt over flomområdet fra Sandeid sentrum (Skaar, 2005)

På bare noen få timer økte vannmengden i de naturlige bekkeløpene voldsomt. Målinger tatt i Rødneelva, nord for Sandeid sentrum, bekrefter dette. Se Figur 6-4. Fra 20.00 på kvelden den 19. august til 02.00 på natten økte vannmengden fra 100 l/s·km² til nesten 1400 l/s·km².



Figur 6-4 Avrenning i Rødneelva (Skaar, 2005)

Denne hastige økningen i vannmengde førte til at bekkeløp flommet over og masse ble erodert bort og transportert med vannstrømmen. Store vannmengder skyllet ut store jord- og steinmasser som sperret veien. Masse fra blant annet Grautåbekken førte til stengt riksveg, som vist i Figur 6-5. Etter oppryddingen ble det gjort et anslag på at denne bekken la igjen 2.000 m³ masse i sjøkanten (Skaar, 2005).



Figur 6-5 Grautåbekken etter delvis opprydding av riksveg (Skaar, 2005)

Den kommunale vegen til Strand ble ødelagt av all massetransporten. Nedslag av steinmasser og gjenretting av stikkrenner førte til svekket bæreevne og et asfaltdekke som ble ødelagt. Se Figur 6-6.



Figur 6-6 Sandsvegen ødelagt av flom (Skaar, 2005)

I tillegg til at riksvegen ble stengt og den kommunale vegen ble ufarbar fikk også eiendommer betydelige skader ved at vannet gravde seg gjennom hager og inn i hus. I boligfeltet, avmerket i Figur 6-2, strømmet store vannmasser over eiendommer. Bebyggelsen er plassert opp i fjellsiden og når bekkeinntakene gikk tette dro vannet med seg stein og grus gjennom eiendommene. I tillegg er det mye asfalt i boligområdet noe som gir mer overflateavrenning, både i volum og intensitet, på grunn av redusert infiltrasjon. For eiendommer nedenfor riksvegen ser en ut fra Figur 6-7 tydelig hvordan vannet har gravd og tatt med seg masser.



Figur 6-7 Utvasking av masse og undergraving av bolighus

Det som utløste flommen og tilhørende løsriving og transport av masser var det korte og intense regnværet som inntraff. Under flommen ble det observert at bekker tok nye løp og enkelte slo seg sammen til større bekker. Den ene årsaken til dette er at bekkeløpene ikke hadde nok kapasitet til å ta unna vannmengden og vannet begynte å grave seg nye løp. Den andre årsaken finner en i forbindelse med jordbruket. Etablering av skogsbilveger til jordbruksformål og vedhogst i fjellsiden kan ha gitt nye løp for vannet. Skogsbilveger avskjærer avrenningen fra sideterrenget og kan i slike tilfeller fungere som terrenggrøft. Vannet konsentreres og strømmer ned disse vegene. Problemet er at det ikke er etablert et sikkert og funksjonelt avløp for disse vannmengdene. Dermed strømmer store vannmasser ukontrollert fram og kan forårsake mye skade ved graving, transport og avsetning av masser.

I etterkant av flommens herjinger var det behov for drift- og vedlikehold av riksvegen og den kommunale vegen. Det første som ble iverksatt var opprydding av riksvegen for å sikre trafikantenes fremkommelighet. Den kommunale vegen ble utbedret med nye stikkrenner med større dimensjon, plastret bekkeinntak og bruk av drenerende masse i grøft. I tillegg ble et nytt asfaltdekke lagt. Noen større utbedringer er ikke utført på riksvegen. Her ble vegen ryddet og grøfter og stikkrenner rensket for masse. I tillegg ble et noe spesielt tiltak for å hindre vannsprut på riksvegen og gang- og sykkelvegen satt opp. Dette er vist i Figur 6-8.

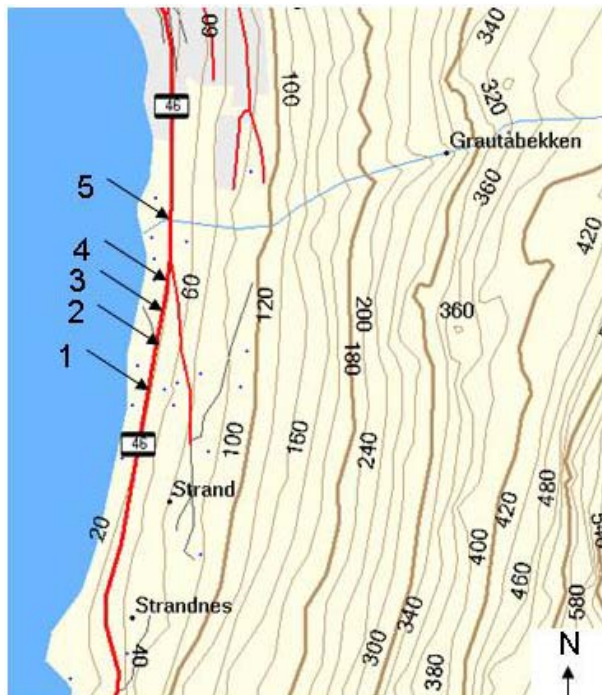


Figur 6-8 Sikring mot vann- og steinsprut fra Grautåbekken ved hjelp av trafikkskilt

6.2 Beskrivelse av detaljpunkter

Gjentetting av stikkrenner og bekkeinntak er hovedårsaken til at vannmasser kommer ut av kontroll. For å sikre bekkeinntakenes funksjonalitet er det viktig at massen avsettes før innløpet eller fraktes bort. Med bakgrunn i dette er fem punkter langs riksveg 46 valgt ut for å utarbeide forslag til forbed-

ringer. Disse er vist i Figur 6-9 og en analyse av punktene, med tilhørende områder, vil bli gitt videre i kapitlet.



Figur 6-9 Plassering av detaljpunkter

Riksveg 46 Hovedparsell 02	
Punkt 1	Km 2,297
Punkt 2	Km 2,181
Punkt 3	Km 2,089
Punkt 4	Km 2,015
Punkt 5	Km 1,850
Grautåbekken	

De fire første detaljpunktene ligger nedenfor den kommunale vegen. Skadene som oppstod på den kommunale vegen hadde stor innvirkning på det som skjedde på riksvegen. Når dreneringssystemet ikke hadde kapasitet nok til å ta unna vannmengdene og massetransport førte til gjentetting av strømningsvegene, kom vannet ut av kontroll. Dette førte til at vann og masser strømmet ukontrollert ned veggskråningen og videre over riksvegen.

Detaljpunkt 1:

Færrest skader er observert rundt detaljpunkt 1 på riksvegen. Bekkeløpet har derimot forårsaket skader ved den kommunale vegen. I Figur 6-10 er utløpet nedstrøms den kommunale vegen vist. Høydeforskjellen mellom utløpet og innløpsbassenget som ligger nedenfor er stor. Dette gjør at vannet treffer innløpsbassenget med høy kinetisk energi. Deretter blir vannet ført inn i ny stikkrenne som frakter vannet gjennom en gårdsplass og til det naturlige bekkeløpet. Under flommen førte store vannmengder til at vannet sprutet over inntaket til stikkrennen som går under gårdsplassen. Dermed begynte vannstrømmen å grave, noe som forårsaket store erosjonsskader. I tillegg fraktet vannstrømmen med seg store mengder masse. Det er ingen indikasjoner på at flommen forårsaket noen skade på selve vegen.

Stikkrennen under den kommunale vegen er 4 m lang og har en dimensjon på 600 mm. Stikkrennen som blir ført under gårdsplassen er omtrent 25 m lang med en dimensjon på 800 mm. Det er uvisst om kapasiteten til stikkrennen ble svekket under flommen. Ut fra skadene som er oppstått ligger hovedproblemet i overgangen mellom den ene til den andre stikkrennen. Under større vannmengder vil vannet bli ført over inntaket til neste stikkrenne.



Figur 6-10 Bekkeutløp nedstrøms kommunal veg. Bildet til høyre viser erosjonsskadene pådratt etter flommen

Under flommen strømmet store vannmengder over gårdsplassen og ned bekkeløpet. Vannet gravde løs masse og fraktet dette med seg. Grunnen til at det ikke ble noen store skader på riksvegen er nok bekkeløpets veg. Bekkeløpet blir ført gjennom ulendt terreng bestående av større steiner, og mye trær og busker. Denne vegetasjonen og steinsettingen har sannsynligvis bremset vannet og avsatt en del masse før bekkeinntaket ved riksvegen. Bekkeløpet mot riksvegen er vist i Figur 6-11. Bildet til høyre viser en skogsveg. Denne skogsvegen fungerte som transportveg for vann og masse under flommen. Som bildet viser er masse fra skogsvegen avsatt rett før bekkeinntaket.



Figur 6-11 Bekkeløp og inntak ved riksveg

Bekkeinntaket er en veite, rektangulært med bredde 80 cm, høyde 50 cm og lengde 6 m som vist i Figur 6-12. Dette bekkeinntaket ble delvis tettet igjen under flommen og vann og masser strømmet over vegen.



Figur 6-12 Bekkeinntak

Selv om vann og masser strømmet ukontrollert over vegen oppstod det ingen skader nedstrøms riksvegen. Mesteparten av vannet ble fanget opp av det plastrede bekkeløpet, vist i Figur 6-13. Størrelsen på bekkeløpet var tilstrekkelig til å ta unna flomvannet.



Figur 6-13 Plastret bekkeløp

Detaljpunkt 2:

For detaljpunkt 2 ble det observert skader på kommunal veg og eiendommer nedenfor riksvegen. Under flommen ble den kommunale vegen ødelagt. I etterkant er ny stikkrenne med en dimensjon på 1400 mm og lengde på 12 m lagt. I tillegg er innløps- og utløpspartiet plastret for å hindre erosjon og utgravinger. Langs den kommunale vegen ble det lagt pukk i grøft. Drensledningen ble ført ut til innløpspartiet som vist i bildet til høyre i Figur 6-14.



Figur 6-14 Plastret bekkeløp og innløp

Fra den kommunale vegen blir vannet ført i bekkeløp til riksvegen. Bekkeløpet har ujevnt dekke som består av større stein og noe vegetasjon. På grunn av dette blir vannets hastighet senket. Vannet blir videre ført inn i en stikkrenne med diameter 1 000 mm og lengde 20 m. Innløpspartiet til stikkrennen er plastret og det er bygd opp vegger som leder vannet inn i selve stikkrennen. Figur av bekkeløpet og innløpspartiet er vist i Figur 6-15.



Figur 6-15 Bekkeløp og innløp for stikkrenne under riksveg

Det var ikke alt vannet som fulgte bekkeløpet ned skråningen under flommen. Mye vann strømmet ned sideterrenget og ble ikke tatt opp av vegens dreneringssystem. Vannet strømmet derfor over riksvegen og rett inn på en privat eiendom. I bildet til venstre i Figur 6-16 ses riksvegen og tilstøtende eiendom. Som figuren viser er det ingen anordning som kan føre større vannmasser trygt vekk. Dette førte til at eiendommen fikk skader i form av graving på et område som var opparbeidet og beplantet. Stikkrennen ble ikke gjenstettet under flommen, men store vannmengder førte til at vannstanden i bekkeløpet på nedstrøms side økte. I bildet til høyre i Figur 6-16 ser en tydelig sår etter at vannet har gravd på begge sider av bekkeløpet. Selv om det var lagt en beskyttelseshud av mindre steiner i bekkeløpet var denne ikke beregnet på de vannmengdene og den vannhøyden som oppstod under flommen.



Figur 6-16 Tilstøtende eiendom til riksveg. Bildet til høyre viser bekkeløpet på nedstrøms side

Detaljunkt 3:

For detaljunkt 3 var økningen i vannmengde under flommen stor. Verken dreneringssystemet på den kommunale vegen eller på riksvegen hadde nok kapasitet til å håndtere de vannmengdene som oppstod. Som for detaljunkt 2 var skadene på den kommunale vegen store og ny veg og nytt dreneringssystem måtte anlegges, som vist i Figur 6-17. I tillegg til ny pukklagt grøft med drensledning ble det lagt inn ny stikkrenne med lengde 6 m og dimensjon 500 mm. Det ble ikke gjort noe tiltak nedstrøms den kommunale vegen. Som Figur 6-17 viser strømmer vannet direkte ut i terrenget der det er lite beskyttelse mot erosjon og graving.



Figur 6-17 Innløp og utløp for stikkrenne på kommunal veg

I skråningen, nedenfor den kommunale vegen, ligger det mye masse og drivgods igjen etter flommen. Dette gjør at bekkeløpet er lite definert, men vannet strømmer fremdeles mot bekkeinntaket.



Figur 6-18 Bekkeløp oppstrøms riksveg. Bildet til høyre viser grøft langs riksveg

Dreneringssystemet langs riksvegen er ikke optimalt. Som Figur 6-18 og Figur 6-19 viser er dreneringssystemet ømfintlig for større vannmengder og spesielt for massetransport. Den åpne veggroften tilfredsstillter ikke krav til grøftedybde, minimum 35 cm under overbygningen, for åpen drenering. I tillegg anbefales det at lengdefallet på grøften er minimum 5 ‰ for å sikre at vannet renner til avløp. (SVV, 2005) Figur 6-18 viser tydelig at vannet står stille i grøften og dermed er det ingen, eller veldig lite fall mot innløpet ved detaljpunkt 3.

Bekkeinntaket er en kum med rist. Under flommen gikk risten tett og vannet strømmet over vegen. Figur 6-19 viser inntaket og hvordan vannet har gravd på eiendommen nedenfor riksvegen. I tillegg førte vannet til erosjon langs fyllingstopp. Bildet til høyre viser at vegen er reparert og nyasfaltert der erosjonen skjedde. Vannet blir fra kummen ført inn i en veite med bredde 50 cm og høyde 50 cm fra kummen og under vegen. Veiten blir deretter ført inn i ny stikkrenne for å føre vannet forbi huset. Her blir det igjen en overgang fra utløpet, hvor vannet strømmer ned i et basseng, for videre å bli ført inn i ny stikkrenne under eiendommen. I tillegg til skadene som oppstod når vannet som strømmet over vegen skjedde det også graving i forbindelse med overgangen her.



Figur 6-19 Bekkeinntak og utløp

Detaljpunkt 4:

Fra terrenget, ovenfor den kommunale vegen, kommer vannet ned i et steinbelagt bekkeløp. I Figur 6-20 kan en tydelig se at røttene langs bekkeløpet er eksponert. Årsaken til dette er at vannet har gravd og fraktet med seg masse under flommen. På grunn av vannmassenes krefter ble også den kommunale vegen ødelagt. Det førte til at ny stikkrenne, med lengde 6 m og dimensjon 800 mm, ble lagt under vegen, samtidig som en formet innløpet som et basseng ved å bygge opp vegger av steinblokker. Vannet strømmer dermed ned i et basseng og videre gjennom stikkrennen.



Figur 6-20 Bekkeløp og innløp

Ved utløpet blir vannet ført direkte ned til riksvegen og et bekkeløp her, som Figur 6-21 viser. Det er litt fall på vannet fra stikkrennen, men skråningen domineres av stein i ulike fraksjoner og det er ikke observert noe større erosjonsskader her. Bekkeløpet er grunt og under flommen strømmet vannet ned langs hele skråningen.



Figur 6-21 Bekkeløp oppstrøms riksvegen

Fra bekkeløpet blir vannet ført ned i et innløp som er oppmurt med steinblokker, som vist i Figur 6-22. Deretter blir vannet fraktet under riksvegen i en kvadratisk veite med tverrsnitt på 50 x 50 cm. Ved utløpet blir vannet ført i et steinbelagt bekkeløp ned til sjøen. Det var ingen skader eller problemer som oppstod nedenfor riksvegen i forbindelse med flommen. Dette kan ha sin forklaring i at det ikke er opparbeidede arealer nedenfor riksvegen ved dette punktet, men kun naturlig terreng med vegetasjon og skog.



Figur 6-22 Innløp

Detaljpunkt 5:

Detaljpunkt 5 er et større bekkeløp som til vanlig har stor vannføring. Grautåbekken, som bekkeløpet er kalt, er avbildet i Figur 6-23. Under flommen var vannføringen stor og bekken fraktet med seg store mengder masse. Dette førte til gjentetting av dreneringssystem og bekkeløp som flommet over. Store mengder vann og masse skyllet ut over riksveg og nedenforliggende eiendom. Riksvegen ble stengt og eiendommen totalt ødelagt av vannets graving.



Figur 6-23 Grautåbekken

Det var ved detaljpunkt 5 den mest drastiske endringen i strømmingssituasjon som skjedde. Under flommen gravde bekken seg nytt permanent strømningsleie. Figur 6-24 viser det gamle bekkeløpet. På bildet til høyre vises en konstruert betongmur. Denne fungerer som en dam og har hatt som hensikt å redusere vannhastigheten og fange opp drivgods og masse.



Figur 6-24 Det "gamle" bekkeleie ligger brakk

I dag frakter Grautåbekken stadig med seg løsmasser og stein fra høyereliggende terreng. Et skilt er satt opp for å hindre vann- og steinsprut på gang- og sykkelvegen og riksvegen. Dreneringssystemet er allikevel sårbart for gjentetting av masse. Veiten som fører vannet gjennom riksvegen har bredde 120 cm og høyde 100 cm. Blir veiten utsatt for opphoping av masse, reduseres kapasiteten og ved tilstrekkelig vannføring kan vannet strømme over vegen. På skulderen er det to stykk nedløp med rister som skal ta unna avrenning fra vegarealet. Disse ristene går stadig tette på grunn av masse som fraktes fra Grautåbekken.



Figur 6-25 Innløp for Grautåbekken og innløp for å ta unna avrenning fra vegbanen

På grunn av ukontrollert nedførsel av vann på nedstrøms side av riksvegen, ble det betydelige erosjonsskader her. Bekkeløpet er godt plastret, men vannet strømmet over dette og førte til at vannet gravde og fraktet med seg store mengder masse fra eiendommen, vist på bildet til høyre i Figur 6-26. I tillegg kan en se konturer langs husveggen, etter en trapp som ble tatt under flommen.

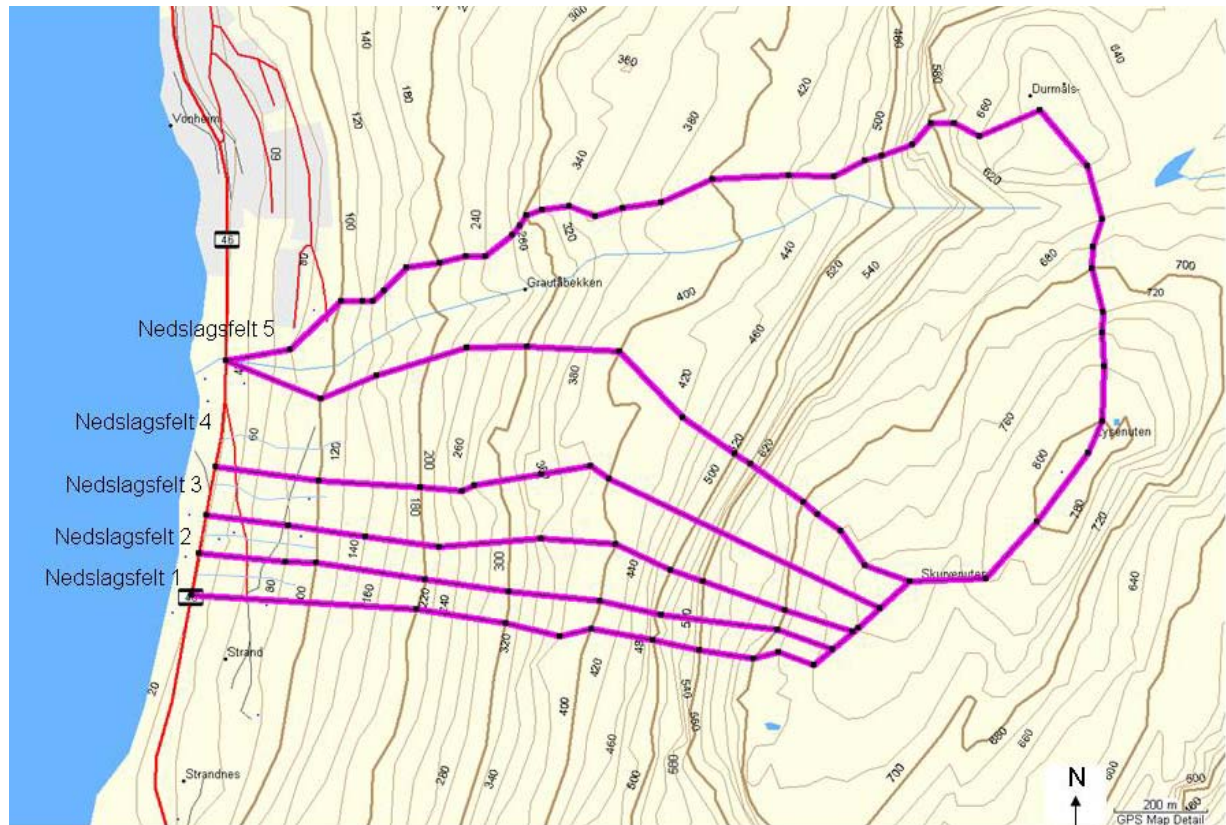


Figur 6-26 Plastret bekkeløp og skade nedstrøms riksveg

6.2.1 Flomberegninger

"Veganleggets avvannings- og drens-system skal være funksjonsdyktig under aktuelle vær- og klimaforhold året gjennom, og i hele veganleggets levetid" (SVV, 2005) Det er derfor viktig at drenerings-systemet er dimensjonert for de vannmengder som kan opptre under en flom. For å undersøke om dagens dreneringssystem for de ulike detaljpunktene har tilfredsstillende dimensjoner skal avrenningen for hvert av punktene beregnes.

De ulike bekkeløpene tar unna avrenning fra terrenget. Det arealet som avrenningen skjer fra kalles nedslagsfelt. Nedslagsfeltene for de ulike bekkeløpene er skissert opp i Figur 6-27.



Figur 6-27 Nedslagsfelt for detaljpunktene

Størrelsen på nedslagsfeltene er gitt i Tabell 6-1.

Tabell 6-1 Nedslagsfelt

Nedslagsfelt	Feltareal [km ²]	Feltareal [ha]
1	0,096	9,6
2	0,117	11,7
3	0,166	16,6
4	0,313	31,3
5	0,914	91,4

Nedslagsfeltene for de ulike bekkeløpene er mindre enn øvre grense for den rasjonelle formel for 2-5 km². Dermed brukes den rasjonelle formel for utregning av avrenningen Q . Avrenningen er da gitt som:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (4-1)$$

der

C = avrenningsfaktor

i = dimensjonerende nedbørsintensitet [l/(s·ha)]

A = feltareal [ha] 1 ha tilsvarer 10 000 m²

(SVV, 2005)

Dimensjonerende nedbørsintensitet er basert på nedbørsmålinger og leses ut fra intensitet/varighet-frekvenskurve (IVF-kurve) for den mest representative nedbørsstasjonen i nærheten. Inngangsparametre er returperiode og tidsfaktor.

Returperiode angir gjennomsnittlig antall år mellom hver gang det inntreffer flom til et visst nivå eller nedbør med en viss intensitet ut fra statistiske vurderinger av nedbørs- og avrenningsobservasjoner. Returperioden for området som er undersøkt er valgt ut fra kravene stilt i Håndbok 018, Vegbygging (SVV, 2005). For veg uten omkjøringsmuligheter og der skadepotensiale er stort ved en flom vil returperioden for kulvert, innløp og utløp være 50 år.

Tidsfaktoren angir tiden vannet bruker fra ytterst i feltet fram til utløpet. Tidsfaktoren for naturlige felt, angitt i minutt, er gitt som:

$$t_c = 0,6 \cdot L \cdot H^{-0,5} + 3000 \cdot A_{se} \quad (4-2)$$

der

L = lengde av feltet [m]

H = høydeforskjellen i feltet [m]

A_{se} = andel innsjø i feltet

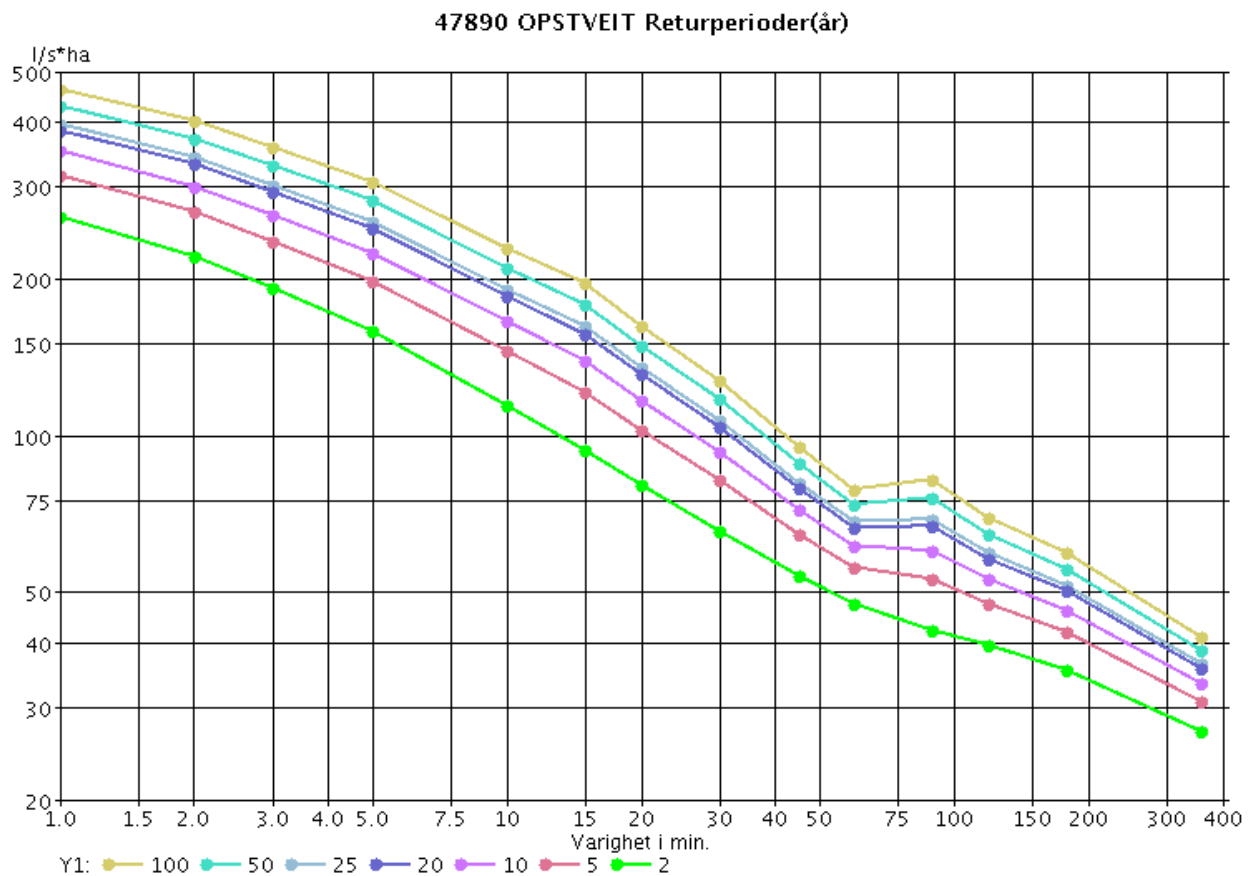
(SVV, 2005)

I de ulike nedslagsfeltene er det ikke innsjø og dermed ser en bort fra det siste leddet i ligning (4-2). Lengde og høydeforskjell i de respektive nedslagsfeltene, samt utregning av tidsfaktoren er gitt i Tabell 6-2.

Tabell 6-2 Utregning av tidsfaktor

<i>Nedslagsfelt</i>	<i>Lengde av feltet [m]</i>	<i>Høydeforskjellen i feltet [m]</i>	<i>Tidsfaktor [min.]</i>
1	1362	720	30,5
2	1402	720	31,3
3	1467	740	32,4
4	1568	740	34,6
5	1939	792	41,3

Opstveit i Kvinnherad kommune er den målestasjonen som ligger nærmest Sandeid, omtrent fire mil i luftlinje nord for Sandeid. I tillegg ligger Opstveit innerst i en fjord omgitt av bratte fjellsider og derfor synes målestasjonen å være representativ for nedbøren i Sandeid. IVF-kurven, vist i Figur 6-28, er basert på nedbørstall i perioden 1968 til 1987.



Figur 6-28 IVF-kurve for Opstveit nedbørsstasjon (Isaksen, 2005)

Ut fra Figur 6-28 og ved bruk av de utregnede tidsfaktorene kan de ulike nedbørsintensitetene avleses. Dette er gjort for de respektive punktene og angitt i Tabell 6-3.

Tabell 6-3 Avlesing av nedbørsintensitet for 50 års returperiode

Nedslagsfelt	Nedbørsintensitet, i [$l/s \cdot ha$]
1	120
2	118
3	117
4	108
5	94

Avrenningsfaktoren, C , er et mål for hvor mye av den totale nedbør som dreneres gjennom det aktuelle stedet og den reflekterer avrenningsområdets karakteristika som topografien, jordtypen, vegetasjon og arealanvendelse. Som vi ser av ligning (4-1) er vannføringen direkte proporsjonal med avrenningsfaktoren. En lav avrenningsfaktor indikerer at mesteparten av vannet blir holdt tilbake en viss tid på et område. En høy verdi på avrenningsfaktoren innebærer at mesteparten av nedbøren strømmer hurtig gjennom området. Områder med mye vegetasjon har en lav C -verdi, mens områder som er bebygde og dermed har store deler impermeable overflater har en høy C -verdi. Karakteristiske C -verdier for ulike typer landbruksområder, for henholdsvis USA og Norge, er gitt i Tabell 6-4.

Tabell 6-4 Avrenningsfaktor C for landbruksområder (Goldman m.fl., 1986)

Arealbruk			Avrenningsfaktor, C	Avrenningsfaktor, C (SVV, 2005)
Landbruk Helning 0-30 %	Oppdyrket	Leirig jord, ingen avling	0,30 – 0,60	0,2 - 0,4
		Leirig jord, avling	0,20 – 0,50	
		Sandig jord, ingen avling	0,20 – 0,50	
		Sandig jord, avling	0,10 – 0,25	
	Beite	Leirig jord	0,15 – 0,45	
		Sandig jord	0,05 – 0,25	
	Skogsområde		0,05 – 0,25	0,2 - 0,5
Skrånninger større enn 30 %	Glatt overflate	0,70 – 0,90		
	Ru overflate	0,50 – 0,70		

Nedslagsfeltene for de ulike detaljpunktene består av skog og beitejord. Helningen for de ulike områdene varierer fra 25 % - 31 %. Antar at en fordeling med 50 % av skogsområde og 50 % beiteområde er representativ for de ulike nedslagsfeltene og finner ut fra dette en karakteristisk verdi samlet for området. Bruker derfor verdiene for skråninger med helning 0-30 % i Tabell 6-4. For skogsområdene velges en verdi ut fra de norske intervallene. For mer bratte og tette overflater brukes de høyeste verdiene. Terrenget i området er bratt, med store helninger, men ikke så tette områder. Derfor velges avrenningsfaktoren $C = 0,42$. Beiteområdene består av morenejord med noe høyere avrenning enn for sandig jord. Ut fra de amerikanske verdiene velges derfor $C = 0,30$ for beiteområdene. For flom med returperiode lenger enn $n=10$ år økes verdiene etter retningslinjer gitt i Håndbok 018, Vegbygging (SVV, 2005) For 50 års returperiode økes avrenningsfaktoren med 20 %. En samlet avrenningsfaktor for området blir dermed:

$$C = (0,5 \cdot C_{skog} + 0,5 \cdot C_{beite}) \cdot 1,20 = 0,42$$

Avrenningen og vannføringen kan da regnes ut som vist i Tabell 6-5.

Tabell 6-5 Utregning av avrenning

Nedslagsfelt	Avrenningsfaktor, C	Nedbørsintensitet, i [l/s·ha]	Feltareal, A [ha]	Avrenning, $Q = C \cdot i \cdot A$ [l/s]
1	0,42	120	9,6	484
2	0,42	118	11,7	580
3	0,42	117	16,6	816
4	0,42	108	31,3	1 420
5	0,42	94	91,4	3 608

Stikkrennen i bekkeinntakene for de ulike nedslagsfeltene må dermed ha kapasitet nok til å ta unna avrenningen utregnet i Tabell 6-5. Ved innløpskontroll er nødvendig dimensjon på stikkrenne gitt i Tabell 6-6. Innløpskontroll opptrer i de tilfeller hvor stikkrennene bygges med minimum fall som for betong er 5 ‰ og 4 ‰ for plast og korrugert stål (Berg m.fl., 1992).

Tabell 6-6 Krav til dimensjon på stikkrenne (Berg m.fl., 1992)

Detaljpunkt	Nødvendig hydraulisk kapasitet, Q [l/s]	Diameter innvendig [mm]
1	484	800
2	580	800
3	816	1000
4	1 420	1200
5	3 608	1600

Stikkrennen har en viss reservekapasitet fordi dimensjonering etter innløpskontroll forutsetter at innløpet ikke er dykket. Dermed vil det være fritt vannspeil i stikkrennen.

De færreste stikkrenner og veiter på kommunal veg og riksveg oppfyller kravene til dimensjon gitt i Tabell 6-6. Krav til dimensjon på stikkrenner gjelder for sirkulære rør. På riksvegen er det flest veiter. For veitene er det gjort et enkelt overslag ved å se på tverrsnittsarealet og deretter regne ut den diameteren som tilsvarer dette. Som Tabell 6-7 viser er det kun detaljpunkt 2 som har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna avrenningen.

Tabell 6-7 Oppfyllding av krav ved dimensjonering etter innløpskontroll

<i>Detaljpunkt</i>	<i>Kommunal veg</i>	<i>Tilstrekkelig kapasitet</i>	<i>Riksveg</i>	<i>Tilstrekkelig kapasitet</i>
1	600 mm	Nei	80 x 50 cm (~800 mm)	Ja
2	1400 mm	Ja	1000 mm	Ja
3	500 mm	Nei	50 x 50 cm (~550 mm)	Nei
4	800 mm	Nei	50 x 50 cm (~550 mm)	Nei
5	-	-	120x100 cm (~1200 mm)	Nei

Det er en del usikkerhet knyttet til utregning av avrenning. Det er mange antagelser som tas underveis, for eksempel ved bestemmelse av avrenningskoeffisient. I tillegg er det vanskelig å skissere opp et nøyaktig nedslagsfelt for et bekkeløp. Spesielt for de fire siste detaljpunktene er det usikkert hvordan fordelingen av avrenning på de ulike bekkeløpene er.

Den kommunale vegen er nyopprustet med større dimensjon på stikkrenner. Dimensjonene er valgt ut fra erfaringer og observasjoner av strømmingssituasjonen under flommen. Ut fra Tabell 6-7 er det uvisst om detaljpunkt 1, 3 og 4 har tilstrekkelig kapasitet i en flomsituasjon.

6.3 Tiltaksstrategier

Bekker som bryter ut av sitt normale løp kan være en viktig skadeårsak i flomsituasjoner. Skadepotensialet er spesielt stort når bekken går gjennom områder som er bebygd. Under sensommerens flom i Sandeid var det bekkeløpene som utgjorde den største faren for veg og eiendom. Vannet flommet over bekkeløpene og kom ned overalt i skråningen. I tillegg ble masse erodert og fraktet med vannstrømmen.

Ut fra dette er det valgt å fokusere på å:

- konsentrere vannet
- sikre strømningsvegene
- kontrollere massetransporten

Vann som strømmer fritt ned skråningen ved større nedbørsintensiteter, skal avskjæres og kanaliseres av åpne grøfter i skråningen. Slike avskjærende grøfter drenerer skråningen og mengde overflatevann som eller ville ha strømmet nedover blir redusert. Grøftene føres til nærliggende bekkeløp som har kapasitet nok til å ta unna vannet. På denne måten blir vannet konsentrert til enkelte bekkeløp og strømmer ikke lenger fritt. I tillegg skal langsgående åpen grøft på riksvegen utbedres slik at den blir funksjonell. Grøften skal sikre avrenning fra kjørebane og fra sideareal og føre dette vannet fram til nærmeste stikkrenne. Grøftene må sikres mot erosjon. Ved store vannhastigheter kreves det plastring eller bruk av andre typer geotekstiler for å redusere faren for erosjon.

Konsentrering av vann til nærliggende bekkeløp fører til at vannmengdene i bekkeløpet øker. Det er derfor viktig å kontrollere om bekkeløpets tverrsnitt og dreneringssystemet har tilstrekkelige dimen-

sjoner til å ta unna dimensjonerende avrenning. I de tilfeller hvor det er fare for at vannet vil stige over bekkeløpets høyde er det mulig å markere bekkeløpene ved å sprengte ut større løp, både i bredde og dybde. Ut fra beregninger gjort i kapittel 6.2.1 har de færreste stikkrenner tilstrekkelig kapasitet i en flomsituasjon. Se Tabell 6-7. Det er derfor høyst aktuelt å skifte til stikkrenner med større dimensjoner.

I flomsituasjoner er det ofte betydelige mengder masse som blir erodert bort og fraktet med vannstrømmen. Denne massen utgjør en risiko hvis den avsettes på et lite egnet sted, som for eksempel i stikkrennen og på vegen. Det er derfor viktig å få kontroll over massetransporten. Dette skal gjøres ved å utforme innløpsområdene for bekkeinntakene. Ved å anlegge et sedimentasjonsbasseng ved bekkeinntaket kan en sikre at massen blir avsatt før innløpet.

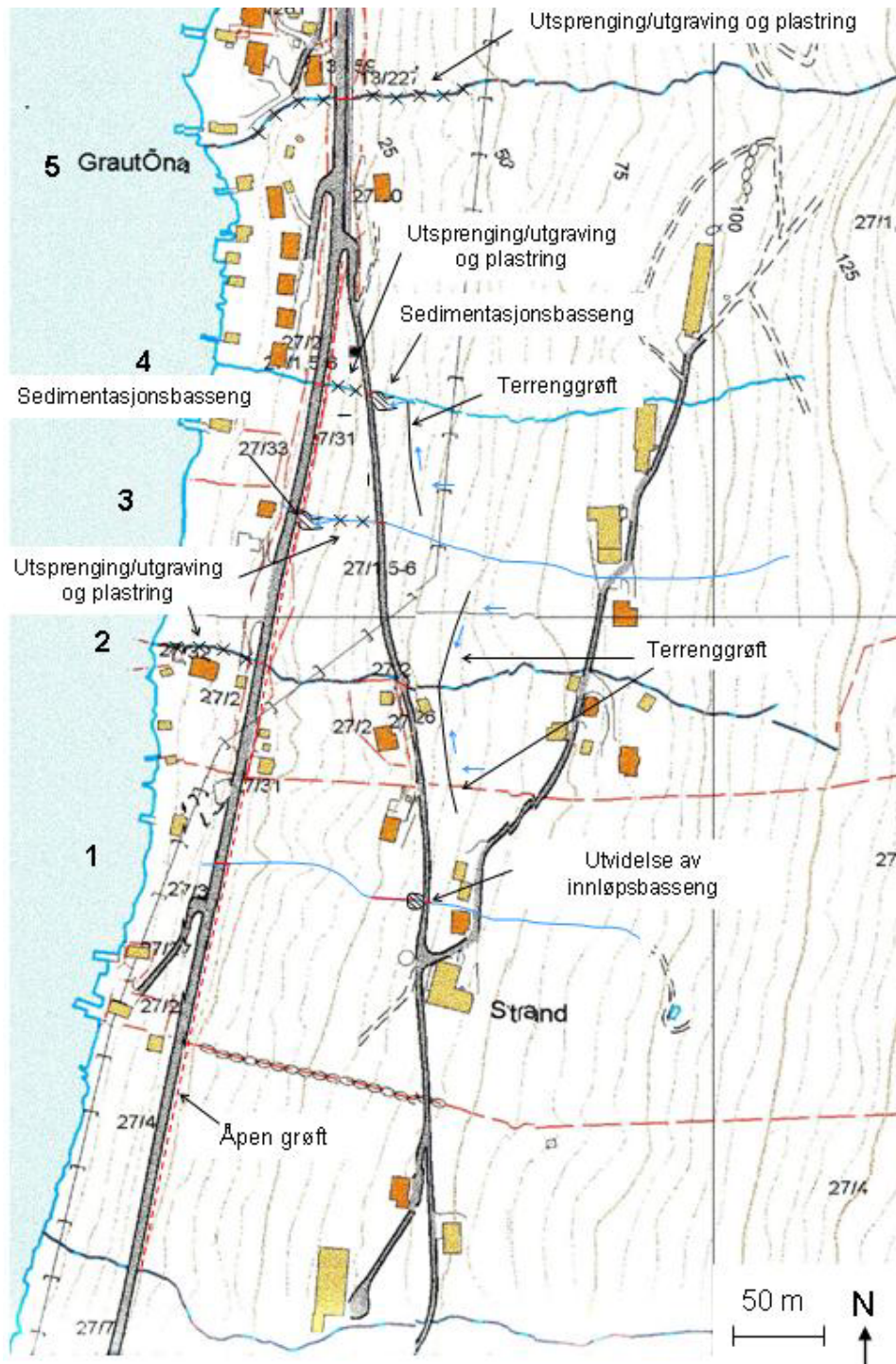
De ulike tiltakene som skal settes i verk er konsentrert i området rundt og ved riksveg og kommunal veg. Det er ikke vurdert tiltak i høyereliggende terreng på grunn av at det krever grundige forundersøkelser. I tillegg er det et krevende og anleggsteknisk vanskelig terreng noe som øker kostnadene betraktelig ved utforming av fysiske tiltak.

Det er sett på to ulike tiltaksstrategier i forbindelse med utbedring av området. Vindafjord kommune og Statens vegvesen har ansvar for hver sin veg. Den kommunale vegen ble opprustet etter flommen, mens riksvegen kun ble ryddet for masse. Den første strategien går dermed ut på et samarbeid mellom de to offentlige etatene. Fordelen med et slik samarbeid er at en kan samhandle de ulike tiltakene som settes i verk og på den måten få et mer samordnet og helhetlig dreneringssystem og system for oppfangning av masse. Når det gjelder massetransport er det spesielt viktig å fange opp massen tidlig slik at en hindrer at massen blir fraktet til sårbare områder. Ved et samarbeid har en mulighet for å anlegge sedimentasjonsbasseng ovenfor den kommunale vegen.

Hvis samarbeid mellom Vindafjord kommune og Statens vegvesen ikke er mulig av økonomiske eller administrative årsaker må vegvesenet alene sørge for at riksvegen er sikret mot fremtidige flommer ved å anlegge et funksjonelt dreneringssystem og system for oppfangning av masse. Tiltaksstrategi 2 vil dermed fokusere på området i og ved riksvegen og hvilke tiltak som er gunstige å bruke.

6.3.1 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 1

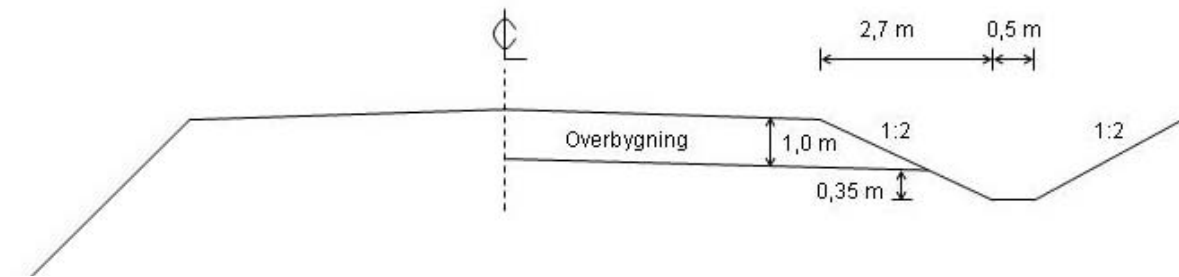
Utbedring etter tiltaksstrategi 1 skal gjennomføres som et samarbeid med Statens vegvesen og Vindafjord kommune. De ulike tiltakene som er tenkt gjennomført er vist i Figur 6-29.



Figur 6-29 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 1

Tiltaksstrategi 1 fokuserer på løsninger som skal kanalisere avrenning fra terrenget og bruk av sedimentasjonsbasseng for å samle opp massetransport. Flest utbedringer vil være i og nær den kommunale vegen, men enkelte sikringstiltak i bekkeløpene i forbindelse med riksveg og utbedring av dreneringssystemet langs riksveg, vil være nødvendig.

Den største mangelen i området i dag er at det ikke finnes en funksjonell grøft langs riksvegen. En åpen grøft skal derfor anlegges langs riksvegen og ha som funksjon å bortlede overflatevann og drenevann fra vegkroppen og sideterrenget. Grøfteprofilen skal utformes som vist i Figur 6-30. Det er her antatt at overbygningen er 1,0 m tykk. I tillegg er en maksimal tillatt skråningshelning på 1:2 valgt for å unngå store skjæringer i sideterrenget.



Figur 6-30 Grøfteprofil for riksveg (SVV, 2005)

I lengderetning må grøften ha en minimum helning på 5 %. Avstanden mellom de ulike stikkrennene er:

Detaljpunkt 1-2:	116 m
Detaljpunkt 2-3:	92 m
Detaljpunkt 3-4:	74 m
Detaljpunkt 4-kryss riksveg/kommunal veg:	80 m

I lengdeprofilen vil toppunktet være mellom to stikkrenner, med helning 5 % mot hver av de respektive stikkrennene. Fra krysset mellom riksveg og kommunal veg, mot detaljpunkt 5, går dreneringssystemet over til lukket drenering. Helningen fra krysset til detaljpunkt 4 er dermed ensidig mot punktet.

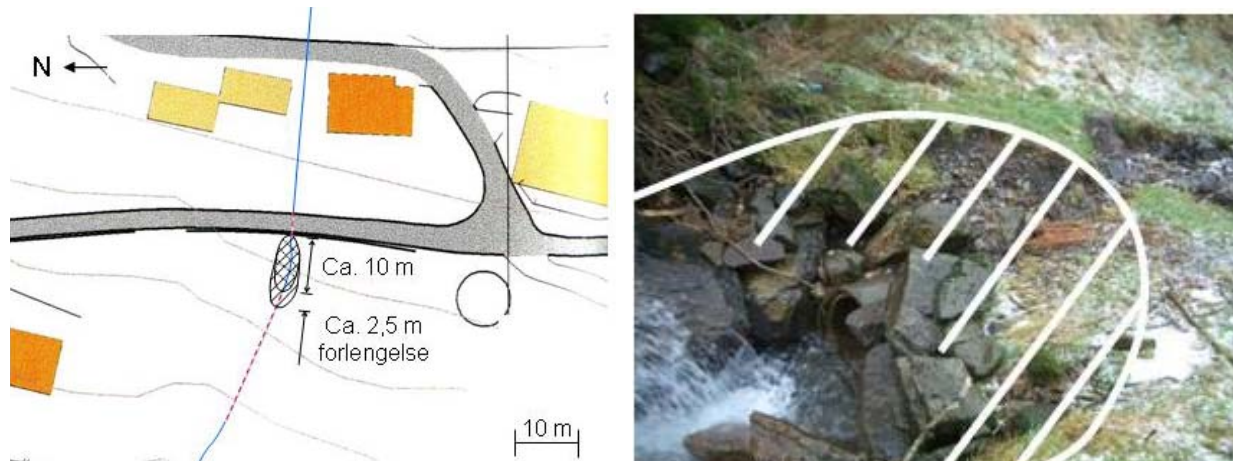
I tillegg til at den langsgående grøften blir oppgradert er det viktig at stikkrenner har den nødvendige kapasiteten under en flom, for å få et helhetlig dreneringssystem. Ifølge flomberegninger utført i 6.2.1, er det de færreste av stikkrennene på riksveg og kommunal veg som tilfredsstillere kravene. Den kommunale vegen er opprustet med nye stikkrenner i større dimensjoner. Selv om de fleste av disse ikke tilfredsstillere krav til dimensjon gitt i Tabell 6-6, er de lagt der med bakgrunn i erfaringer og observasjoner fra flommen og dimensjonene kan dermed være hensiktsmessige. Med hensyn til skadepotensialet ved en eventuell flom er det riksvegen og eiendommene nedenfor som er mest utsatt. Det er derfor anbefalt å skifte til større dimensjoner på stikkrenner ved riksvegen slik at en oppnår tilstrekkelig kapasitet under en flomsituasjon.

Det er alltid usikkerhet om stikkrennen kan ta unna all tilrenning, enten på grunn av at tilrenningen er større enn dimensjonerende flom eller stikkrennen har gått tett. En funksjonell grøft har den fordel at vannet kan strømme til nærliggende stikkrenner når kapasiteten til stikkrennen overskrides eller stikkrennen går tett. Dermed kan de nærliggende stikkrennene fungere som reserveløp, jmfør kapittel 4.3, og faren for at veg og eiendommer skal bli oversvømt blir dermed redusert.

Videre i kapittelet skal de ulike løsningene for detaljpunktene presenteres.

Detaljpunkt 1:

Observasjoner gjort i etterkant av flommen, viste relativt få skader ved og rundt riksvegen i detaljpunkt 1. En del erosjon og massetransport ble initiert ved kommunal veg, i overgangen mellom stikkrenne fra kommunal veg til neste stikkrenne. Massen ble fraktet ned til vegen og avsatt her. For å forhindre erosjon og massetransport ved større vannføringer er det dermed nødvendig å utvide innløpsbassenget. I dag er dette innløpsbassenget omtrent 10 m langt. En utvidelse i lengderetningen på 2,5 m, som illustrert i Figur 6-31, bør være tilstrekkelig for å forhindre at vann spruter over. Innløpsbassenget må plastres for å forhindre graving i og ved innløpet til stikkrennen.



Figur 6-31 Skisse av utvidelse av innløpsbasseng

Detaljunkt 2:

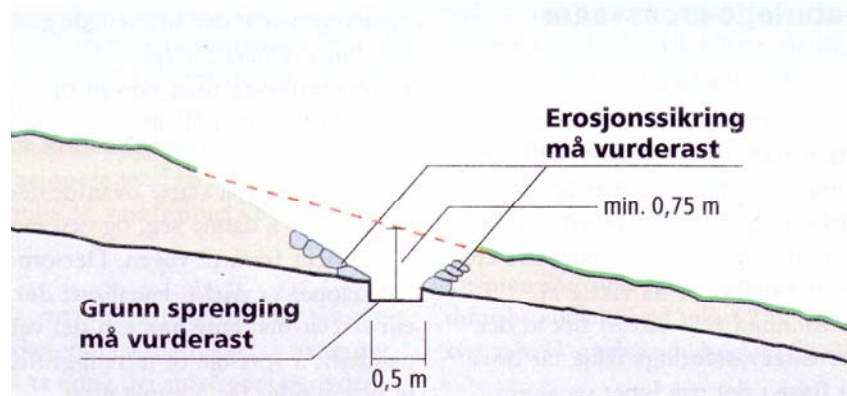
Detaljunkt 2 er det eneste punktet som har et dreneringssystem for kommunal veg og riksveg som har reservekapasitet i forhold til kravene gitt i Tabell 6-6. Det er derfor valgt å kanalisere mer avrenning fra terrenget til dette bekkeløpet.

To avskjærende terrenggrøfter skal anlegges over den kommunale vegen, som vist i Figur 6-32, for å ta imot avrenning fra terrenget. For å sikre at vannet strømmer til bekkeløpet bør helningen være større enn 10 % (Norem, 1998). Den ene terrenggrøften er 85 meter lang med en helning på 12 %, mens den andre er 75 m lang med en helning på 13 %. Begge grøftene har dermed helning som er større enn anbefalt minimum.



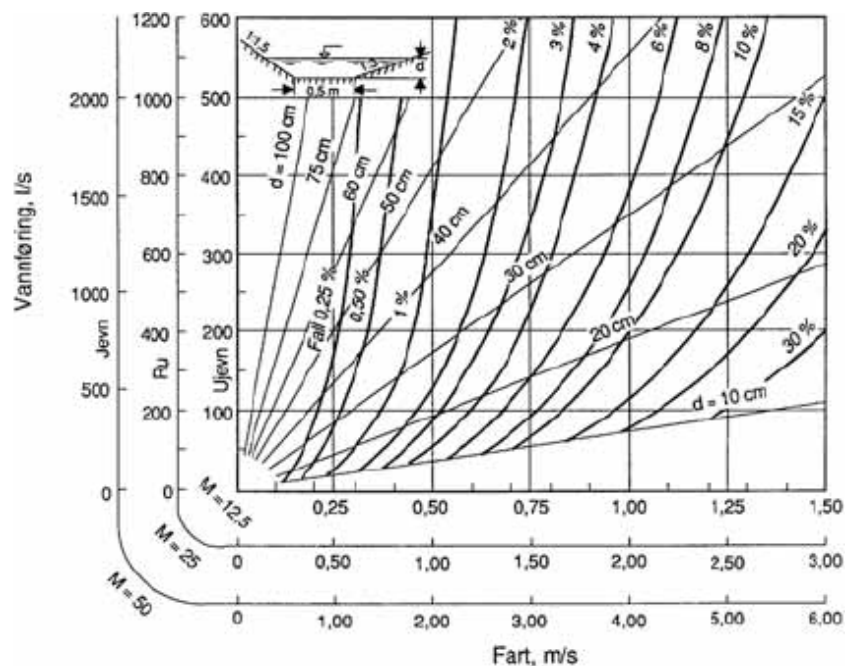
Figur 6-32 Skisse av terrenggrøfter ovenfor kommunal veg

Tverrsnittet utføres etter verdier gitt i Figur 6-33. Bredden på grøftebunnen skal være ca. 0,5 m og dybden av grøften minimum 0,75 m. Best effekt oppnås hvis grøften blir gravd helt ned til fjellet for da får en avskjært alt sigevannet.



Figur 6-33 Tverrsnitt av terrenggrøft (Norem, 1998)

Erosjonssikring må vurderes for hver av de to terrenggrøftene. Avrenningen for nedslagsfelt 2 er på 580 l/s. Fordeler en denne avrenningen på de to terrenggrøftene vil hver av grøftene maksimalt frakte 290 l/s. Antar at helningen på grøfteveggen er 1:1,5 og 1:3. Med et Manningstall på 25 vil hastigheten, ut fra vannføringsdiagrammet gitt i Figur 6-34, for de to terrenggrøftene ligge rundt 2 m/s. I Håndbok 018, Vegbygging (SVV, 2005) er vannhastighet uten fare for erosjon gitt for ulike kledningsmaterialer. For jord med lett vegetasjon ligger vannhastighet uten fare for erosjon mellom 0,5 - 1,2 m/s, mens for jord med kraftig vegetasjon ligger hastigheten mellom 1,0 og 2,0 m/s. Hastigheten i de ulike terrenggrøftene vil derfor kunne initiere erosjon. Det anbefales derfor at grøftene plastrer.



Figur 6-34 Vannføringsdiagram for grøft med flat bunn (SVV, 2005)

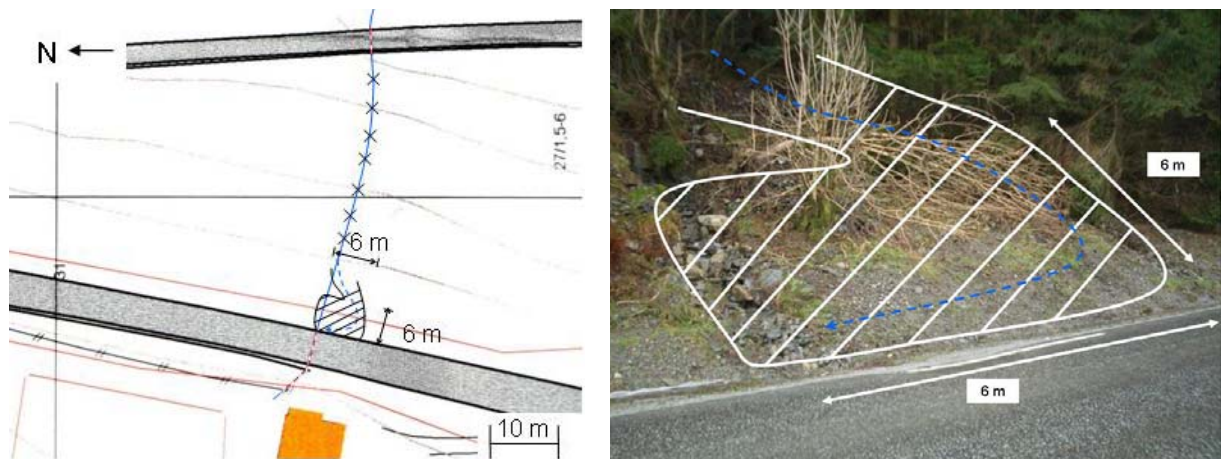
Siden vannmengden i bekkeløpet antageligvis øker, siden en får avskjært all avrenning fra terrenget, må bekkeløpet nedenfor riksvegen gjøres større slik at det kan ta imot denne økningen i vannmengden. Under flommen gikk vannet over bekkeløpets sider og begynte å grave langsetter, se Figur 6-16. Skadeomfanget kan bli stort i og med at bekkeløpet ligger tett innpå et hus. Det er derfor ønskelig å sprengre dypere og bredere bekkeløp for å forhindre at vannet strømmer over. Deretter gis bekkeløpet en ru plastring for å redusere farten på vannet.

Detaljpunkt 3:

Under flommen var detaljpunkt 3 et sårbart punkt. Mye massetransport og dårlig bekkeinntak på riksvegen førte til at vannet strømmet over vegen og gjorde stor skade på nedenforliggende eiendom. Ut fra dette skadeomfanget og de konsekvenser som kan oppstå ved større vannføringer er det valgt å avlaste dette bekkeløpet for noe vannføring. Det er anlagt avskjærende grøft i detaljpunkt 2 og i detaljpunkt 4, som beskrives i neste punkt. Disse grøftene tar unna mye av avrenningen til bekkeløpet. Det er allikevel nødvendig å definere bekkeløpet og utbedre bekkeinntaket. Bekkeløpet, ned mot riksveg, skal gjøres mer tydelig ved å grave ut løp med større bredde og dybde og legge ut grov steinsetting. Denne grove steinsettingen skal bidra til å redusere hastigheten på vannstrømmen.

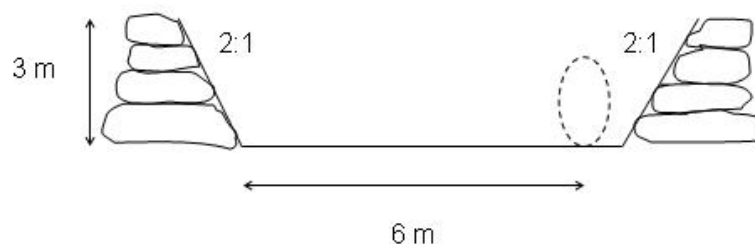
I dag er bekkeinntaket en kum med rist som fort går tett. I stedet for kummen ønskes en åpen innløpsutforming i kombinasjon med et sedimentasjonsbasseng for å fange opp all massetransporten. Sedimentasjonsbassenget er planlagt utført med forskjøvet hovedløp, presentert i kapittel 4.2. Fordelen med å forskyve stikkrennen i forhold til strømningsretningen er at strømningsvegen øker og det er dermed større sannsynlighet for at massen blir avsatt. I modellforsøkene som ble utført ved denne type oppsett fikk en også provosert fram vannstandssprang på grunn av at fyllingen hindret jetstrøm fra å dannes. Dette vannstandsspranget bidro til raskere avsetning av masse.

I dag strømmer bekkeløpet direkte mot kummen. For å få til et sedimentasjonsbasseng med forskjøvet hovedløp må bekkeløpet forskyves og føres inn i sedimentasjonsbassenget. Prinsippet for utforming av et slikt sedimentasjonsbasseng er skissert opp i Figur 6-35. På grunn av bratt sideterreng er det valgt et sedimentasjonsbasseng som er 6 m bredt og har en avstand fra bekkeløp til senter stikkrenne på 6 m.



Figur 6-35 Skisse av sedimentasjonsbasseng

Sedimentasjonsbassenget må graves ut for å få nødvendig dybde med tanke på å hindre sprut og oversvømmelse av vann. Tverrsnittet av et tilfeldig valgt snitt er vist i Figur 6-36. Det må plastres opp sidevegger for å hindre erosjon. Sideveggene har en anbefalt høyde på 3 m og en helning på 2:1.



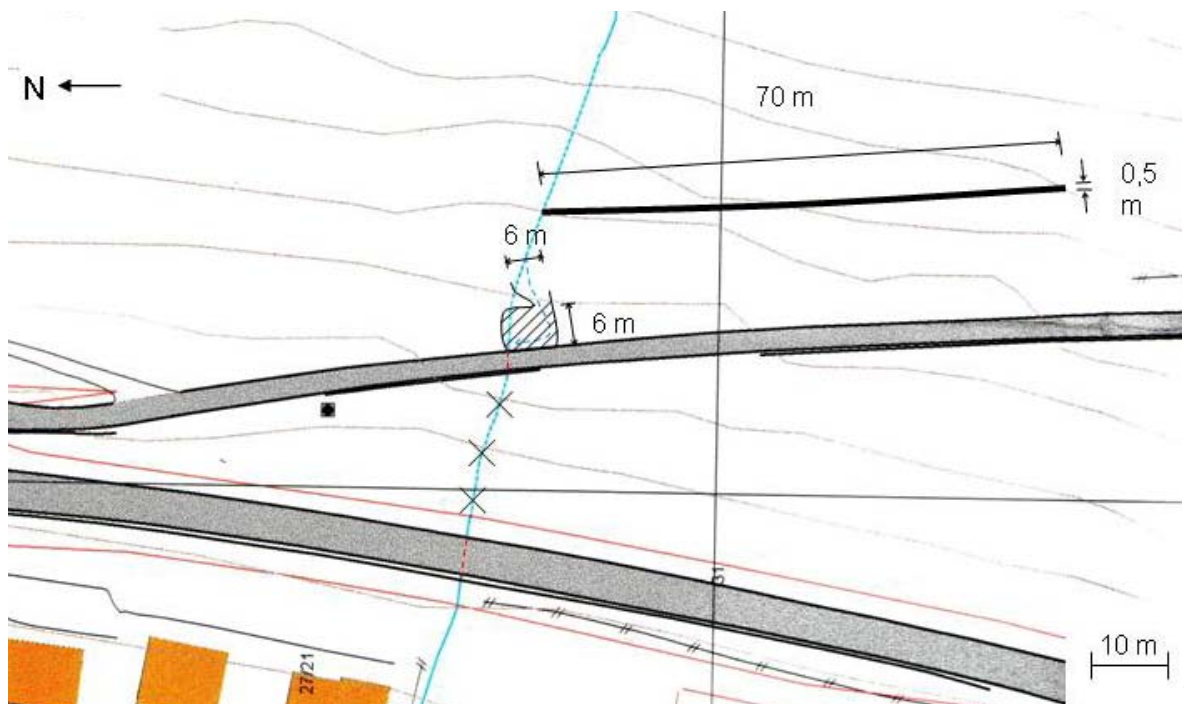
Figur 6-36 Tverrsnitt av sedimentasjonsbasseng

Detaljpunkt 4:

Langs bekkeløpet til detaljpunkt 4 ble mye masse erodert og fraktet med vannstrømmen. Mesteparten av massen ble erodert i bekkeløpet ovenfor den kommunale vegen. Massetransport og store mengder vann førte til at skadeomfanget på den kommunale vegen var stort. For å forhindre gjentetting av stikkrennen ble innløpsområdet utbedret etter flommen. Innløpet er i dag utformet som et basseng, med vegger plastret opp av steinblokker. Bassenget er relativt lite og det er ønskelig å utvide det slik at bassenget kan samle opp større mengder masse. Samtidig skal bassenget gis en utforming med forskjøvet hovedløp for å hindre at massen avsettes rundt stikkrennens innløp. Plassering av bassenget er skissert opp i Figur 6-37. Som skissen illustrerer må bekkeløpet forskyves og føres inn i selve bassenget for at en utforming med forskjøvet hovedløp skal være mulig. Sedimentasjonsbassenget utformes for øvrig etter samme prinsipp som for bassenget i detaljpunkt 3.

Nedstrøms kommunal veg er det behov for å grave ut et mer markert bekkeløp for å hindre at vannet flommer over og strømmer ned hele skråningen. Ved å kle løpet med ujevn steinsetting får en redusert hastigheten og dermed energien til vannstrømmen.

I tillegg til sedimentasjonsbasseng skal en avskjærende terrenggrøft anlegges ovenfor kommunal veg, for å avlaste detaljpunkt 3. Grøften er 70 m lang med en helning på 14 %. Grøften utformes etter tverrsnittet gitt i Figur 6-33. Hastigheten i terrenggrøften kan finnes ut fra vannføringsdiagrammet i Figur 6-34. Antar at rennen avskjærer og kanaliserer halvparten av avrenningen for nedslagsfelt 4 og en fjerdedel av avrenningen for nedslagsfelt 3. Det gir en total vannmengde på 914 l/s. Med et Mannings-tall på 25 og tverrsnitt gitt i vannføringsdiagrammet vil hastigheten være på ca. 2,8 m/s. Hastigheten er dermed såpass stor at erosjonssikring av terrenggrøften er nødvendig. (SVV, 2005)

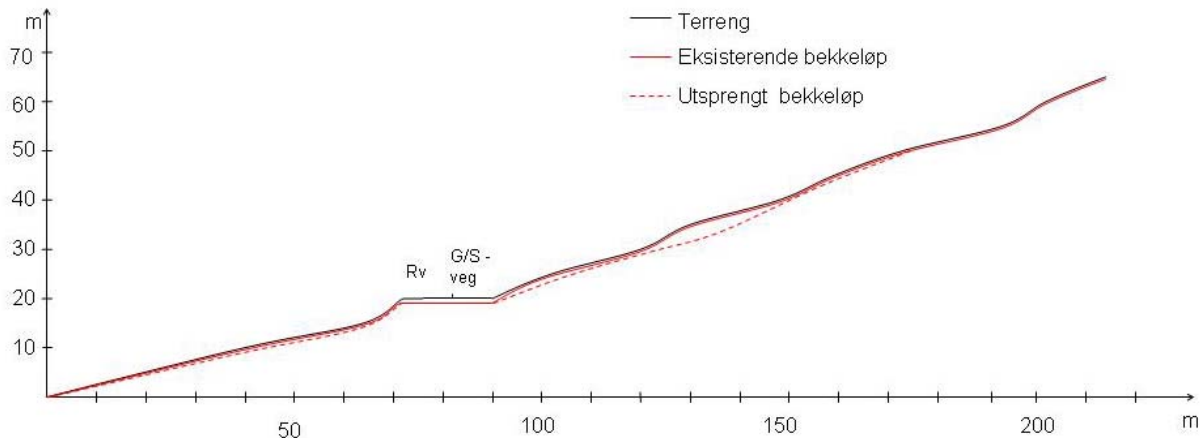


Figur 6-37 Skisse av sedimentasjonsbasseng, terrenggrøft og utspredning av bekkeløp

Detaljpunkt 5:

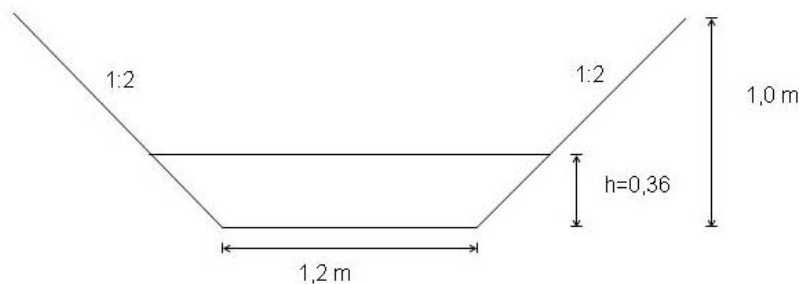
Grautåbekken er det bekkeløpet i området som frakter mest vann, 3 608 l/s. Under flommen gravde bekken nytt leie. Denne forandringen førte til mye erosjon og massetransport under og i etterkant av flommen. For å hindre stadig utgraving av ny masse langsetter bekkeløpet må bekkeløpet gjøres større.

Lengdeprofilen av Grautåbekken, opp til 65 meters høyde, er vist i Figur 6-38. Grautåbekken kommer fra omtrent 640 meters høyde og har en gjennomsnittlig helning på 30 %. Bratt terreng i kombinasjon med høy vannføring gjør det vanskelig å få kontroll på vannmassene og massetransporten. Ved å sprengne ut et tverrprofil som er både dypere og bredere får en sikret at vannet ikke flommer over og eroderer langsetter bekkeløpet. I Figur 6-38 er et foreslått utsprengt bekkeløp vist. I lengdeprofil skal bekkeløpet sprenges dypere fra sjøen og til lengde 170 m. I tillegg er det foreslått å slake ut helningen ved lengde 120 m til 140 m for å hindre at vannets hastighet øker i kort avstand fra riksvegen.



Figur 6-38 Lengdeprofil av Grautåbekken

Et forslag til tverrsnitt for bekkeløpet nedstrøms riksvegen, er illustrert i Figur 6-39. Ved bruk av Mannings formel, likning (2-4), fås en vannhøyde i bekkeløpet på $h = 0,36$ m for dimensjonerende avrenning $Q = 3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ og Mannings tall 30. Dette er et grovt overslag, i og med at det ikke er normalstrømning i Grautåbekken, og Mannings formel kun gjelder i de tilfeller. Derfor er det valgt en dybde på bekkeleiet på 1,0 m nedstrøms riksvegen for å være sikker på at bekkeløpet har tilstrekkelig kapasitet. Bekkeleiet må plastres for å beskytte mot erosjon.



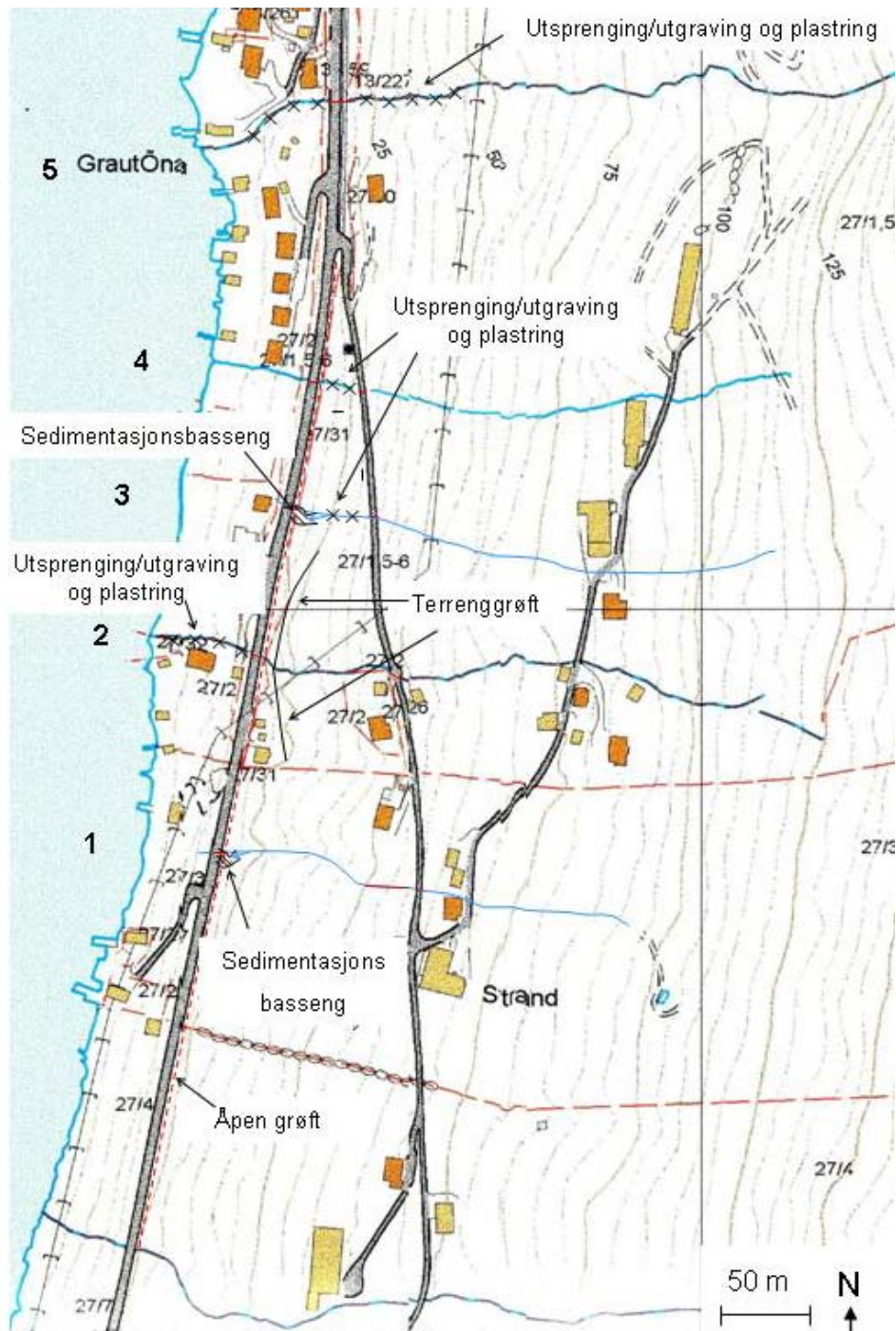
Figur 6-39 Tverrsnitt av Grautåbekken nedstrøms riksveg

6.3.2 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 2

Utbedring etter tiltaksstrategi 2 innebærer at Statens vegvesen alene iverksetter tiltak for å sikre riksvegen og nærliggende områder mot flom.

Under sensommerens flom ble den kommunale vegen ødelagt av all massetransporten. I etterkant er denne vegen blitt utbedret slik at den skal kunne ta imot større vannmengder og massetransport. Bekkeinntakene på den kommunale vegen er utformet slik at vann og masser direkte blir spylt gjennom stikkrennen. Dermed er det riksvegen og områdene rundt denne som får ansvaret for å ta hånd om all massetransporten. Siden ingen tiltak er utført nedstrøms den kommunale vegen etter flommen, er det

viktig å få satt i gang tiltak snarlig slik at vegen er kapabel til å kunne ta imot større vannmengder og masse fra terrenget. Forslag til utbedringer ved og langs riksvegen er vist i Figur 6-40.



Figur 6-40 Forslag til utbedringer for tiltaksstrategi 2

Denne tiltaksstrategien er forholdsvis lik tiltaksstrategi 1, men tiltakene er konsentrert i og ved riksvegen. Avrenningen fra terrenget skal avskjæres av terrenggrøfter, massen skal enkelte steder fanges opp ved hjelp av sedimentasjonsbasseng og noen bekkeløp skal sikres større kapasitet og plastres mot erosjon.

Den viktigste utbedringen blir å få i gang et funksjonelt dreneringssystem med langsgående åpen grøft langs riksveg og tilstrekkelig kapasitet på stikkrennene. Den åpne langsgående grøften skal utformes etter retningslinjene gitt i tiltaksstrategi 1, kapittel 6.3.1.

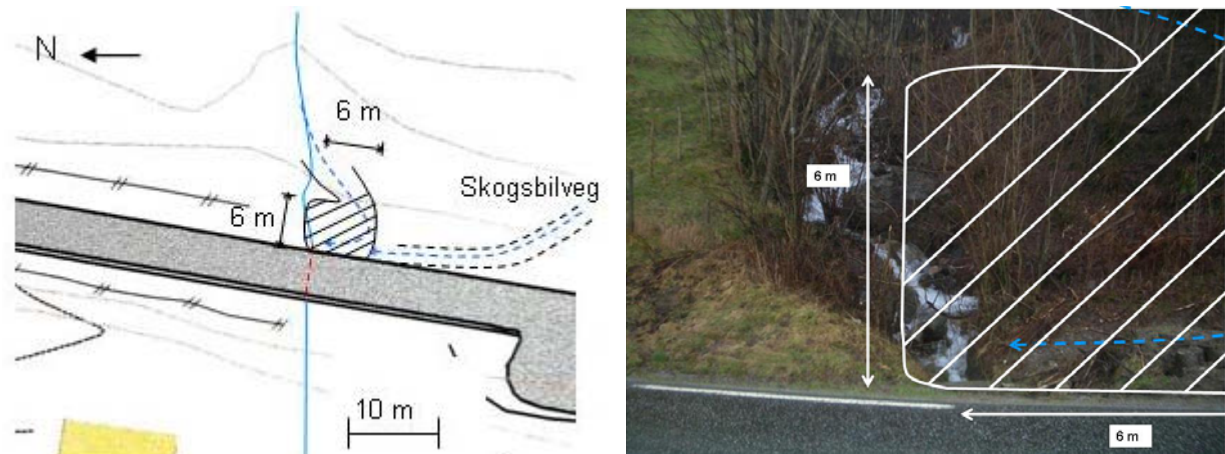
De fleste stikkrennene langs riksvegen er veiter med kvadratisk tverrsnitt. Driftsmessig er det større fordel med stikkrenner som har sirkulært tverrsnitt. Sirkulære stikkrenner er i større grad mer selvrensende og massen avsettes ikke like lett i selve røret. Det bør derfor prioriteres å skifte ut veitene med stikkrenner som har tilstrekkelig dimensjon til å ta unna dimensjonerende vannmengder. Spesielt gjelder dette veitene i detaljpunkt 3, 4 og 5 som ikke tilfredsstillt krav til dimensjon. Se Tabell 6-7. Veiten i detaljpunkt 1 tilfredsstillt kravene til dimensjon, men bør vurderes å skiftes ut på grunn av tverrsnittsformen. Stikkrennen i detaljpunkt 2 er den eneste som i dag har reservekapasitet og som derfor ikke behøver å oppgraderes.

Ved et godt fungerende dreneringssystem med tilstrekkelig kapasitet på stikkrenner kan den langsgående grøften fungere som en alternativ flomveg. Hvis en stikkrenne går tett eller på annen måte ikke har kapasitet nok til å ta unna vannmengdene som kommer, leder grøften vannet til neste stikkrenne. På denne måten fungerer de nærliggende stikkrennene som reserveløp til de andre stikkrennene.

Videre i kapitlet skal de ulike forslagene til utbedringer beskrives for hvert av de ulike detaljpunktene.

Detaljpunkt 1:

Problemer som kan oppstå ved detaljpunkt 1 er knyttet til massetransport. På grunn av dårlig overgangsordning mellom stikkrenner ved kommunal veg vil vannet ved større vannføringer strømme over stikkrennen og forårsake erosjon og massetransport. Under flommen ble mesteparten av massen fraktet med bekkeløpet og av en skogsbilveg. Når vann og masse ble ført ned denne skogsbilvegen strømmet det i retning av innløpet, se Figur 6-41 og Figur 6-11. Ved å anlegge et sedimentasjonsbasseng ved innløpet kan en fange opp masse som blir ført med bekkeløpet og i tillegg ta imot vann og masser fra skogsbilvegen. Plassering av sedimentasjonsbassenget er vist i Figur 6-41. Bekkeløpet blir her ført inn i bassenget for å få en utforming med forskjøvet hovedløp. Tverrsnittet utføres etter Figur 6-36.



Figur 6-41 Skisse av sedimentasjonsbasseng. Bildet til høyre viser kun deler av basseng ved innløpet

Detaljpunkt 2:

Dimensjonen på stikkrennen i detaljpunkt 2 er større enn hva som er nødvendig for å ta imot dimensjonerende vannføring. Det er derfor valgt å kanalisere mer avrenning fra terrenget til dette punktet. Dette skal gjøres ved hjelp av to avskjærende grøfter, som skissert opp i Figur 6-42. Den ene grøften er 60 m lang med en helning på 13 %, mens den andre er 80 m lang med en helning på 12 %. Tverrsnittet av terrenggrøften er gitt i Figur 6-33.

Det er viktig å undersøke om terrenggrøftene må erosjonssikres. Er vannhastigheten i de respektive grøftene større enn 1,2 m/s ved lett vegetasjon, og 2,0 m/s ved kraftig vegetasjon, bør kanalen steinset-

tes (SVV, 2005). Avrenningen for nedslagsfelt 2 er på 580 l/s. fordeles denne mengden på de to terrengrøftene blir det 290 l/s. den lengste grøften vil også ta unna noe av avrenningen fra nedslagsfelt 3. Anslår denne mengden til å være en fjerdedel av total avrenning for nedslagsfeltet, noe som gir 204 l/s ekstra i vannmengde. Ut fra vannføringsdiagrammet i Figur 6-34, kan en avlese vannhastigheten i de to grøftene. Med et Manningstall på 25 vil hastigheten for den lengste grøften med total vannføring på 494 l/s ha en vannhastighet over 2 m/s og erosjonssikring er derfor nødvendig. For den andre terrengrøften vil vannhastigheten ligge rundt 2,0 m/s. Det anbefales at også denne grøften steinsettes.



Figur 6-42 Skisse av terrengrøft og utsprenging av bekkeløp

Når avrenningen fra terrenget blir avskjært vil bekkeløpet få økt vannmengde. Det er derfor nødvendig å sikre at bekkeløpet på nedstrøms side av riksvegen har et tverrsnitt som er stort nok til å frakte disse vannmengdene. Under flommen var vannstanden så høy at den begynte å grave langsetter bekkeløpet. Bekkeløpet må derfor gjøres dypere og bredere slik at en hindrer graving ved større nedbørmengder. I tillegg må det plastres for å sikre mot erosjon i selve løpet.

Detaljpunkt 3:

Dreneringssystemet ved detaljpunkt 3 går tett inntil et hus og skadeomfanget ved en flom kan være stort. Det er derfor valgt å avlaste dette bekkeløpet for noe vannføring ved å anlegge terrengrøft i detaljpunkt 2.

Bekkeinntaket i detaljpunkt 3 er sårbart for gjentetting. Inntaket er en kum med rist som fort går tett når vann frakter med seg masse. Det er derfor viktig å utbedre innløpet. Det er derfor planlagt å anlegge et åpent innløp i kombinasjon med et sedimentasjonsbasseng. På denne måten blir massen avsatt før innløpet og vannet har fri strømningsveg gjennom stikkrennen.

Sedimentasjonsbassenget er tenkt utført som for tiltaksstrategi 1, se Figur 6-35 og Figur 6-36. Bekkeløpet, ned mot sedimentasjonsbassenget, skal gjøres tydeligere ved å grave løpet dypere og bredere. I

tillegg må det graves ut nytt løp for å føre bekkeløpet inn i bassenget slik at en får et basseng med forskjøvet hovedløp. Bekkeløpet plastres med grov steinsetting for å redusere hastigheten og minke energien på vannstrømmen.

Detaljpunkt 4:

Ved detaljpunkt 4 var det den kommunale vegen som fikk størst skader på grunn av erosjon og masse-transport. I etterkant av flommen ble derfor innløpsområdet utbedret som et basseng og området rundt innløpet ble plastret. På denne måten blir noe masse fanget opp. Mengde masse som strømmer igjennom stikkrennen blir dermed mindre og det er derfor mer sannsynlig at denne massen vil følge vannstrømmen gjennom dreneringssystemet og ut til sjøen. Dette forutsetter at veiten på riksvegen blir skiftet ut til stikkrenne med større dimensjon. Ut fra dette det antatt at det ikke er behov å iverksette tiltak for å stoppe masse før riksvegen. Derimot er det behov for å grave ut et tydeligere bekkeløp ned mot riksvegen. I dag er bekkeløpet grunt og lite markert og en ønsker derfor å utvide det slik at vannet ikke får mulighet til å flomme over løpet og komme ut av kontroll. I tillegg må bekkeløpet plastres med grov stein for å unngå erosjon og samtidig redusere vannhastigheten.

Detaljpunkt 5:

Detaljpunkt 5, Grautåbekken, skal utbedres etter forslag gitt i tiltaksstrategi 1, kapittel 6.3.1. Bekkeløpet skal sprenges dypere og bredere som illustrert i Figur 6-38 og Figur 6-39, for å hindre at vannet strømmer over løpet. I tillegg plastres bekkeløpet for å sikre mot erosjon og for å redusere vannets hastighet og dets energi.

7 Konklusjon

For å hindre stort skadeomfang i en flomsituasjon er det viktig å ha et funksjonelt dreneringssystem som har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna de dimensjonerende vannmengdene. Ved større nedbørmengder er det som oftest ikke bare store mengder vann som er problemet, men også erosjon og tilhørende transport av disse løsrevne massene. Hvis denne massen avsettes ved innløpet eller i selve stikkrennen blir kapasiteten redusert og en kan risikere at vannet finner alternative strømningsveger.

For både modellforsøket og ved befaring av en flomutsatt strekning i Sandeid har det vært ønskelig å komme fram til løsninger som kan kontrollere denne massetransporten. Fokuset har vært rettet mot ulike utforminger av innløpet for å finne en optimal løsning for å forhindre gjentetting av stikkrennen. Det viktigste funksjonskravet for utformingen skal være å sikre at stikkrennen har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna dimensjonerende vannmengder.

I modellforsøket er to ulike strategier for massetransport undersøkt:

- selvrensende stikkrenne der vannstrømmen holder stikkrennen fri for masse og
- utfelling av partikler før stikkrenne

De ulike strategiene er undersøkt ved å variere ulike faktorer under forsøk. Disse faktorene kan oppsummeres til:

- Plassering av stikkrenne
- Variasjon av grøftebredde
- Bruk av energidrepere
- Ulik fyllingshøyde

Strategiene er avhengig av strømningssituasjonen samtidig som strømningssituasjonen avhenger av de ulike faktorene. Resultatene er basert på bruk av steinmateriale i to ulike fraksjoner, Vassfjell 8-11 og Vassfjell 16-22. Det tilsvarer fraksjoner på 16-22 cm og 32-44 cm i natur. Tendensen i forsøkene har vært at den største fraksjonen Vassfjell 16-22 avsettes raskere og mer konsentrert, mens den mindre fraksjonen, Vassfjell 8-11 har en mer spredt og lengre avsetting. Forskjellen mellom de to fraksjonene har derimot lite å si for de ulike strategiene og vil bli behandlet under ett. På steder med andre karakteristiske partikkelstørrelser kan dette ha betydning for avsettingslengden og bør vurderes nærmere.

En strategi med selvrensende stikkrenne oppnås når en har en strømningssituasjon med jetstrøm. En slik strømningssituasjon opptrer når stikkrennen er plassert i strømningsretningen og bremseklosser ikke er innsatt. For at massen skal bli fraktet direkte gjennom stikkrennen, uten å avsettes, kreves en jevn og stabil jetstrøm og en minste kritisk vannmengde. I naturen er det sjelden at jetstrømmen opptrer stabilt. Det vil alltid være fare for at drivgods som stein, kvister og trær setter seg fast i strømningsretningen og framprovoserer vannstands sprang eller endrer retningen til jetstrømmen. Dermed kan ukontrollert avsetting fås i og ved stikkrenne.

En strategi med selvrensende stikkrenne fungerer best ved små grøftebredder. Ut fra modellforsøkene bør bredden være maksimalt 12 m, men kortere lengder anbefales. Resultater viser at mest masse ble fraktet gjennom stikkrennen med en bredde på grøft på 10 cm, noe som tilsvarer 2 m i virkeligheten. Strategien er sårbar og ved planlegging bør en derfor ikke basere seg på en slik utforming. I tilfeller der en har stor plassmangel kan derimot denne strategien være et godt alternativ.

En strategi med utfelling av partikler før stikkrenne har vist seg å fungere bra for noen typer oppsett. I andre tilfeller har type oppsett ført til avsetting av masse i og rundt selve stikkrennen. Det er derfor viktig å være bevisst hvilke faktorer som gir en god utforming og hvilke type oppsett som bør unngås.

Resultater fra forsøk har generelt gitt at massen avsettes i sedimentasjonsbasseng ved:

- bruk av bremseklosser

- forskjøvet hovedløp
- bassenglengder større enn 12 m i natur for stikkrenner i strømningsretningen

Det er ønskelig at massen blir avsatt før innløpet slik at stikkrennens kapasitet ikke blir svekket. I de fleste forsøkene er massen enten fraktet direkte gjennom stikkrennen med jetstrøm eller avsatt i eller rundt selve stikkrennen. Enkelte kombinasjoner har derimot gitt avsetning i rimelig avstand fra stikkrennen. Det er disse avsetningene som har gitt best resultater med tanke på å hindre gjentetting og opprettholde kapasiteten.

I Tabell 7-1 er det gitt en oversikt over mulige kombinasjoner ved bruk av sentrert hovedløp og anbefalinger i forhold til avsetning av masse for å opprettholde kapasiteten. I de tilfellene masse ikke er avsatt er det jetstrømmen som frakter massen gjennom stikkrennen. Som tabellen viser er det få kombinasjoner som anbefales med hensyn til avsetning av masse. For de korte sedimentasjonslengdene vil massen avsettes i selve stikkrennen for forsøk ved bruk av bremseklosser. Ved 60 cm sedimentasjonsbasseng, det vil si 12 meter i natur, avsettes mesteparten av massen foran stikkrennen og kapasiteten reduseres noe. Det er kun for 90 cm sedimentasjonsbasseng og ved bruk av bremseklosser massen avsettes i så lang avstand fra stikkrennen at kapasiteten ikke reduseres. 90 cm sedimentasjonsbasseng i modellforsøket tilsvarer en lengde på 18 meter i virkeligheten.

Tabell 7-1 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med sentrert hovedløp

<i>Bassenglengde</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>60 cm</i>	<i>90 cm</i>
<i>Faktorer</i>				
<i>Lav fylling</i>	Ikke avsatt	Ikke avsatt	Ikke avsatt	Må unngås
<i>Lav fylling m/bremseklosser</i>	Må unngås	Må unngås	Bør unngås	Anbefales
<i>Høy fylling</i>	Ikke avsatt	Ikke avsatt	Må unngås	Må unngås
<i>Høy fylling m/bremseklosser</i>	Ikke avsatt	Må unngås	Bør unngås	Anbefales

For oppsett med hovedløp og reserveløp er mulige kombinasjoner og tilsvarende anbefalinger gitt i Tabell 7-2. Dette oppsettet gir samme resultater som for sentrert hovedløp. Plassering av stikkrenne i strømningsretningen er sårbart for gjentetting, både med og uten bremseklosser. Fordelen ved dette oppsettet er at hvis hovedløpet går tett kan reserveløpet ta unna noe av vannmengden. For at reserveløpet skal ha full kapasitet må minimumsavstanden mellom hovedløp og reserveløp være på 10 m (50 cm i modell) for å hindre at massen tetter igjen dette løpet.

Tabell 7-2 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med hovedløp og reserveløp

<i>Bassenglengde</i>	<i>30 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Faktorer</i>		
<i>Lav fylling</i>	Ikke avsatt	Ikke avsatt
<i>Lav fylling m/bremseklosser</i>	Må unngås	Bør unngås

For både oppsett med ”sentrert hovedløp” og ”hovedløp og reserveløp” må lengden på sedimentasjonsbassenget være over 60 cm, det vil si 12 meter i natur, for å hindre kapasitetsreduksjon. Den beste kombinasjonen for stikkrenne plassert i strømningsretningen er 90 cm sedimentasjonsbasseng. Å utforme et sedimentasjonsbasseng etter disse prinsippene er derimot plasskrevende.

De beste resultatene fra modellforsøkene er oppnådd for oppsett med forskjøvet hovedløp. Fordelen ved forskjøvet hovedløp er at stikkrennen er forskjøvet i forhold til strømningsretningen og dermed forskjøvet i forhold til avsetning av masse. En minimumsavstand på 30 cm (6 meter i natur) mellom strømningsretningen og plassering av stikkrenne må tilstrebes for å hindre at massen tetter igjen løpet. Problemet som har oppstått ved et slikt oppsett er at for forsøk utført med lav fylling og de minste bassenglengdene blir massen fraktet med vannstrømmen over vegen. I noen tilfeller er massen avsatt på selve vegen. Dette er ikke en ønsket situasjon ut fra trafiksikkerhetsmessige årsaker. Som Tabell 7-3 viser er det kun disse tilfellene med lav fylling og korte bassenglengder en må være oppmerksom på. De andre kombinasjonene i tabellen er anbefalt ut fra positive resultater i modellforsøket.

En utforming med forskjøvet hovedløp krever en kraftig plastring av fyllingen i strømningsretningen for å hindre erosjon og utvasking av fyllingen.

Tabell 7-3 Anbefalinger ved bruk av ulike oppsett med forskjøvet hovedløp

<i>Faktorer</i>	<i>Bassenglengde</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>60 cm</i>
<i>Lav fylling</i>		Bør unngås	Bør unngås	Anbefales
<i>Lav fylling m/bremseklosser</i>		Bør unngås	Bør unngås	Anbefales
<i>Høy fylling</i>		Anbefales	Anbefales	Anbefales
<i>Høy fylling m/bremseklosser</i>		Anbefales	Anbefales	Anbefales

Forskjøvet hovedløp er ut fra modellforsøkene den mest pålitelige strategien med hensyn til å hindre gjentetting av stikkrenne. På steder der det er problemer med mye massetransport og avsetning av masse i innløpsområdet er forskjøvet hovedløp en anbefalt utforming.

Fokuset ved utbedring av flomutsatt strekning i Sandeid var å få kontroll på massetransporten. På de mest utsatte detaljpunktene er sedimentasjonsbasseng som baserer seg på prinsipp om forskjøvet hovedløp planlagt å anlegges. For å få til dette er det nødvendig å forskyve bekkeløpet og føre det inn i selve sedimentasjonsbassenget. Ut fra Tabell 7-3 er det anbefalt et basseng på 12 m for lav fylling for å hindre massetransport over vegen. Det bratte terrenget i området setter begrensinger for hvor stort bassenget kan være. Det ble derfor valgt å gå for en løsning med størrelse på basseng som er 6 m bredt og har en avstand fra bekkeløp til senter stikkrenne på 6 m. Siden bekkeløpet føres inn i sedimentasjonsbassenget vil ikke vannet strømme direkte på fyllingen. Dermed vil mengde vann over vegen synke og sannsynligheten for at masse blir fraktet over vegen er dermed liten.

I tillegg til å anlegge sedimentasjonsbasseng for å fange opp transportert masse er det ønskelig å få kanalisert og fanget opp vann fra sideterrenget og fraktet dette til et trygt avløp. Prioriterte tiltak blir da å:

- sikre at dreneringssystemet og bekkeløpene har tilstrekkelig kapasitet til å ta unna dimensjonerende vannmengder
- avskjære avrenning fra sideterrenget ved å anlegge terrenggrøft
- sikre bekkeløp og avskjærende terrenggrøft mot erosjon

Ved hjelp av forholdsvis enkle tiltak er det mulig å redusere skadeomfanget ved større nedbørsmengder. Resultater fra modellforsøk viser at for enkelte oppsett er sedimentasjonsbasseng et effektivt tiltak for å sikre tilstrekkelig kapasitet i stikkrennen. Bruk av sedimentasjonsbasseng i innløpsområdet til stikkrenner for å sikre avsetning er derfor en anbefalt strategi på steder med mye massetransport.

Forslag til videre arbeid:

Det er noe arbeid som gjenstår for å finne den optimale utformingen av et innløpsområde. I modellforsøkene som er gjennomført er kun relativt ensgradert masse benyttet. Det er derfor ønskelig at avsetningsmønster ved bruk av velgradert masse blir undersøkt og eventuelt hvordan drivgods som kvister, trær og jord innvirker på gjentetting av stikkrenner.

I modellforsøkene har det blitt utført forsøk ved bruk av bremseklosser. Disse energidreperementene framprovoserer vannstandssprang og gjør at massen avsettes raskere. Et forslag til videre forsøksprogram innebærer å undersøke effekten ved å variere plassering, størrelse og type energidreperement. I tillegg kan bruk av rister foran inntak, en eller flere, samt plassering av disse for å stoppe massetransport være interessant å undersøke.

Oppgaven og modellforsøkene har ikke tatt for seg innløpsutforming ut fra sikkerhetsmessige hensyn. De ulike innløpsutformingene etter Håndbok 018, Vegbygging (SVV, 2005) er:

- A: frontmur, ca. vinkelrett på rørets lengdeakse
- B: innløpet formet etter helningen på fyllingen

- C: utstikkende rørende

Alle disse innløpsutformingene innebærer en risiko ved utforkjøring. Det er derfor viktig å undersøke og komme frem til gode løsninger for trafikksikre innløpsutforminger. I tillegg er det mulig å undersøke hvilken betydning de ulike innløpsutformingene har på avsetningsmønsteret.

Resultater fra modellforsøket har gitt gode retningslinjer for utforming av innløpsområdet for å hindre gjentetting. I tillegg til en god utforming krever et sedimentasjonsbasseng regelmessig vedlikehold for å fungere optimalt. God utforming i samspill med regelmessig vedlikehold er løsningen på å redusere skader på vegnett og eiendommer forårsaket av massetransport.

Referanseliste

- Amundsen, Sissel Alne (2004): Drenering av vegens sideområder. Tiltak mot erosjon og sedimentasjon, Prosjektoppgave ved NTNU, faggruppe for Veg- og samferdsel
- ASCE (1977) ASCE (American Society of Civil Engineers) Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 54: Sedimentation engineering. ASCE, New York
- Berg, Arve, Lunde, Trygve og Mosevoll, Gunnar (1992): Flomberegning og kulvertdimensjonering, SINTEF NHL, Trondheim
- Cederwall, Klas og Larsen, Petter (1976): Hydraulik för väg- och vattenbyggare. LiberLäromedel, Malmö
- Crowe, Clayton T., Elger, Donald F. and Roberson, John A. (2001): Engineering Fluid Mechanics, Wiley, USA
- Emdal, Arnfinn (1999): Introduksjon til geoteknikk, NTNU Institutt for geoteknikk, Trondheim
- Goldman, Steven J., Jackson, Katharine og Bursztynsky, Taras A. (1986): Erosion & sediment control handbook, McGraw-Hill Book Company, New York
- Isaksen, Ketil (2005), Meteorologisk institutt: Personlig meddelelse, 28.02.2005
- Julien, Pierre Y. (1998): Erosion and sedimentation. Cambridge, USA
- Nordal, R. S. (1965): Notat nr. 194 Drenering for vegar, Statens vegvesen, Veglaboratoriet, Oslo
- Norem, Harald (1998): Sikring av vegar mot isras, Statens vegvesen Hordaland og Sogn- og fjordane
- Norem, Harald (1974): Utforming av veger i drivsnøområder, NTNU Institutt for veg- og jernbanebygging, Trondheim.
- Norem, Harald (2004): Personlig meddelelse, 10.11.2004
- NVE (1998) Sæterbø, Einar, Syvertsen, Liza og Tessaker, Einar: Vassdragshåndboka. Håndbok i forbygningsteknikk og vassdragsmiljø. Tapir, Trondheim
- Simons, Daryl B. og Sentürk, Fuat (1992): Sediment transport technology. Water and sediment dynamics. Water Resources Publications, Colorado
- Skaar, Tor Gunnar (2005), Teknisk sjef, Vindafjord kommune: Personlig meddelelse, 31.01.2005
- SVV (1994), Håndbok 165 Sikring av vegskråninger, Statens vegvesen, Oslo
- SVV (1998): Rensing av overvann fra veg. Aktuelle tiltak, Statens vegvesen, Miljø- og samfunnsavdelingen, Oslo
- SVV (2005): Håndbok 018 Vegbygging, Statens vegvesen, <http://www.vegvesen.no/vegnormaler/hb/018/index.stm> (20.05.05)
- SVV 2003: Håndbok 231 Rekkverk, Statens vegvesen, http://www.vegvesen.no/vegnormaler/hb/231/231pdf/pdf/handbok_231.pdf (14.05.05)

Vindafjord kommune (2005): Vindafjord kommune, <http://www.vindafjord.kommune.no/> (15.05.05)