

RAPPORT

04 1998



NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

Tharan Fergus
Jim Bogen

BUNNTRANSPORT I VASSDRAG - EN GJENNOMGANG AV INTERNASJONAL LITTERATUR



HYDROLOGISK AVDELING



NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

TITTEL Bunntransport i vassdrag – en gjennomgang av internasjonal litteratur	RAPPORT 04 98
	DATO 30. Januar 1998
FORFATTER Tharan Fergus og Jim Bogen	ISBN 82-410-0330-7

SAMMENDRAG

NVE har forvaltningsansvaret for målinger av sedimenttransport i vassdrag og for å gi tillatelse til forskjellige tekniske inngrep i vassdrag. NVE har også ansvar for å registrere virkninger av slike inngrep på hydrologiske og sedimentologiske forhold. Elveløpene i norske vassdrag av er av svært varierende karakter og sammensatt av mange ulike delstrekninger. Bunnmaterialet består ofte av grus og stein der sand utgjør en mindre andel. Det er et behov for å øke kunnskapen om transportprosessene til bunnmaterialet, målemetodikk, matematiske modeller og virkninger av forskjellige inngrep. Det er i denne sammenheng utført et litteratursøk på internasjonale publikasjoner om bunntransportprosesser i grus- og steinelver. Rapporten beskriver de siste 20 års utvikling innen fagfeltet. Rapporten er oppdelt tematisk og refererer litteratur vedrørende bunntransportprosesser, målemetodikk, matematiske modeller og virkninger av inngrep med spesiell vekt på grus- og steinelver. Prosjektet har blitt gjennomført ved seksjon for Miljøhydrologi på Hydrologisk avdeling og ble finansiert av FoU programmet 'Vassdragsmiljø' på NVE.

ABSTRACT

The Norwegian Water Resources and Energy Administration (NVE) is responsible for managing Norwegian watercourses and giving permission for different technical encroachments in Norwegian rivers. NVE is also responsible for registering the consequences of such encroachments on hydrological conditions including sediment transport and erosion and for mandatory measurements of sediment load. Norwegian rivers are characterised by their glacial origin with many highly varied reaches within a catchment. The bed-material in the majority of Norwegian rivers is generally in the gravel to cobble size range with only a minor fraction of sand. There is a need to increase our knowledge on bedload transport processes in gravel-bed rivers and especially measuring methods, mathematical modelling and the consequences of different encroachments. A search and review of international literature on these subjects has therefore been carried out. The report describes the development within the field especially over the last 20 years. It is divided thematically and is a review of international literature within the subjects bedload transport processes, measuring methods, mathematical modelling and case studies of the consequences of different encroachments. The project was carried out at the Environmental Hydrology Section of the Hydrology Department and was financed by the research and development programme 'Vassdragsmiljø' at NVE.

EMNEORD

Litteratursøk, bunntransport, grus- og steinelver, målemetodikk, modeller, virkninger av inngrep

ANSVARLIG UNDERSKRIFT

Arve Tvede
seksjonssjef

Omslagsbilde: Tromsa, august 1995. Foto: Hans Christian Olsen

INNHALDSFORTEGNELSE

1.	INNLEDNING	1
1.1	Bunntransportprosesser	2
2.	SØKEMETODIKK	6
3.	MÅLING AV BUNNTRANSPORT - METODIKK	7
3.1	Direkte målinger av bunntransporten	7
3.2	Indirekte metoder	15
4.	MODELLER	19
4.1	Bunntransportlikninger	20
4.2	Sammensatte modeller	25
5.	VIRKNINGER AV INNGREP	29
5.1	Kraftutbygging	30
5.2	Vassdragstekniske inngrep	32
5.3	Grusuttak	34
	REFERANSER	36

1. Innledning

Det er det bunntransporterte materiale i en elv som sammen med vannføringen bestemmer elveløpets form - gradient, bredde og dybde eller dets *hydrauliske geometri*. Endringer i bunntransporten og/eller vannføringen som følge av forskjellige inngrep kan medføre endringer i løpets form og bunnmaterialets sammensetning. Dette kan føre til økte flomproblemer, problemer med erosjon og påvirke det biologiske liv i vassdragene. Enkelte steder skaper også den naturlige transporten av bunnmateriale problemer ved at løpene fylles igjen, bygger seg opp og tar nye veier. Det bunntransporterte materiale i norske vassdrag er også en viktig fornybar grusressurs. Store uttak av grus kan, der disse overstiger den naturlige tilførselen, føre til negative konsekvenser slik som økt erosjon.

Elveløpene i norske vassdrag er av svært varierende karakter. De glasiale storformene har gitt spesielle bibetingelser for den postglasiale utviklingen av elveløp og elvesletter i vassdragene. Løpsstrekninger med stryk i fast berg og irregulære forhold skifter med alluviale delstrekninger der elven har fylt opp glasiale basseng og dannet elvesletter. Sedimentkildene er ofte ujevnt fordelt slik at delstrekningene får en svært varierende karakter. De mange innsjøene medfører også at hvert vassdrag er sammensatt av en rekke lokale erosjons- og sedimentasjonssystemer.

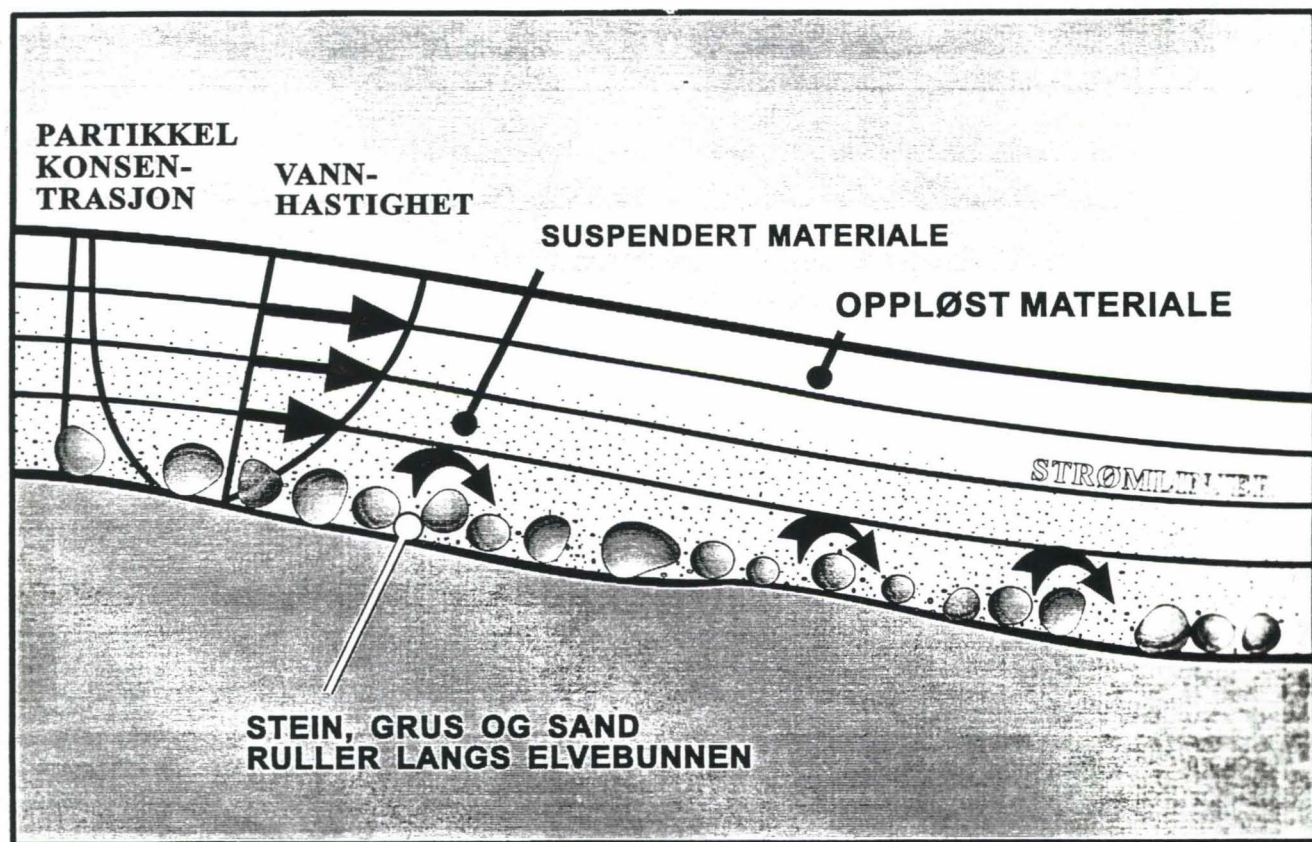
NVE har forvaltningsansvaret for å registrere virkningen av vassdragsreguleringer på hydrologiske forhold og derunder endringer i materialtransporten. NVE gir også tillatelse til grusuttak og har ansvaret for å påse at uttak ikke gir miljøskader i vassdragene. Det er derfor et behov for å øke kunnskapen om bunntransportprosesser, målemetodikk og matematiske modeller. I denne sammenhengen er det utført et systematisk søk og gjennomgang av internasjonal og nasjonal litteratur om temaet.

Dette søket konsentrerer seg først og fremst om litteratur som omhandler transport av grus og stein (fra 2.0 mm – meget fin grus og oppover) og prosesser i grus- og steinelver. Dette har sammenheng med at de fleste norske vassdrag er karakterisert ved at bunnmaterialet består av grus og stein der sand utgjør en mindre andel av volumet av bunnmaterialet. Bunntransporten i grus- og steinelver er svært variabel og varierer først og fremst med vannføringen men også med en rekke andre faktorer. Både måling og modellering av bunntransport i gruselver er forholdsvis komplisert og kunnskapen om gruselver har hittil vært mangelfull i forhold til

sandelvene. I senere år har det imidlertid vært en betydelig internasjonal forskning på prosesser i gruselver. Litteratursøket har derfor som formål å klarlegge den internasjonale utviklingen på fagfeltet.

1.1. Bunntransportprosesser

Bunntransporten er den delen av sedimentene i transport som ruller, hopper og glir langs bunnen av elva. En skisse av transportprosessene i et elveløp er gitt i figur 1.



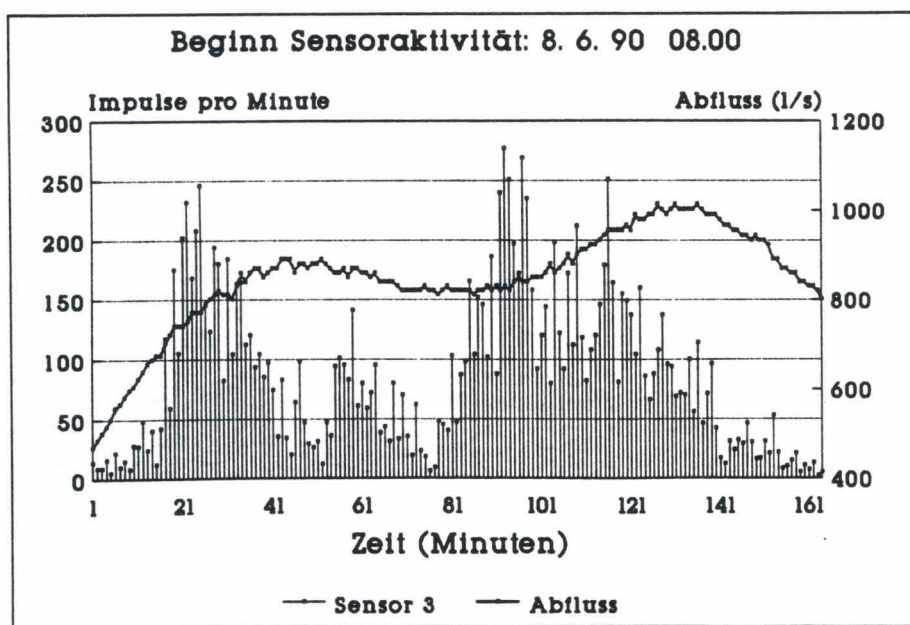
Figur 1. Transportprosesser i vassdrag. Stein og grus ruller langs bunnen mens det suspenderte materialet svever i vannmassen. Det oppløste følger vannmassene og sedimenteres ikke ut. (fra Bogen, 1986; 1993).

Materiale større enn 0.2 mm i diameter (dvs. fin sand og oppover) regnes til det bunntransporterte materiale. Materiale finere enn dette blir som regel transportert i suspensjon. Man kan skille mellom bunntransportprosesser i sandelver, hvor kornstørrelsen til bunnmaterialet hovedsakelig er mindre enn 2.0 mm og bunntransportprosesser i grus- og steinelver der bunnmaterialet hovedsakelig er større enn 2.0 mm (Gomez, 1987). Transporten av bunnmateriale i en sandelv foregår ved at hele bunnformer (fra små former som ripples til

store slik som dyner og små banker) forflytter seg nedover løpet. I gruselver foregår transporten ved at enkelte partikler beveger seg sporadisk i vannstrømmen eller som diskontinuerlige strømmer av materiale. I sandelver foregår bunntransporten ved bortimot alle vannføringer mens det kun foregår ved høye vannføringer i grus- og steinelver. For en videre diskusjon av forskjellene mellom grus- og sandelver se Simons & Simons (1987).

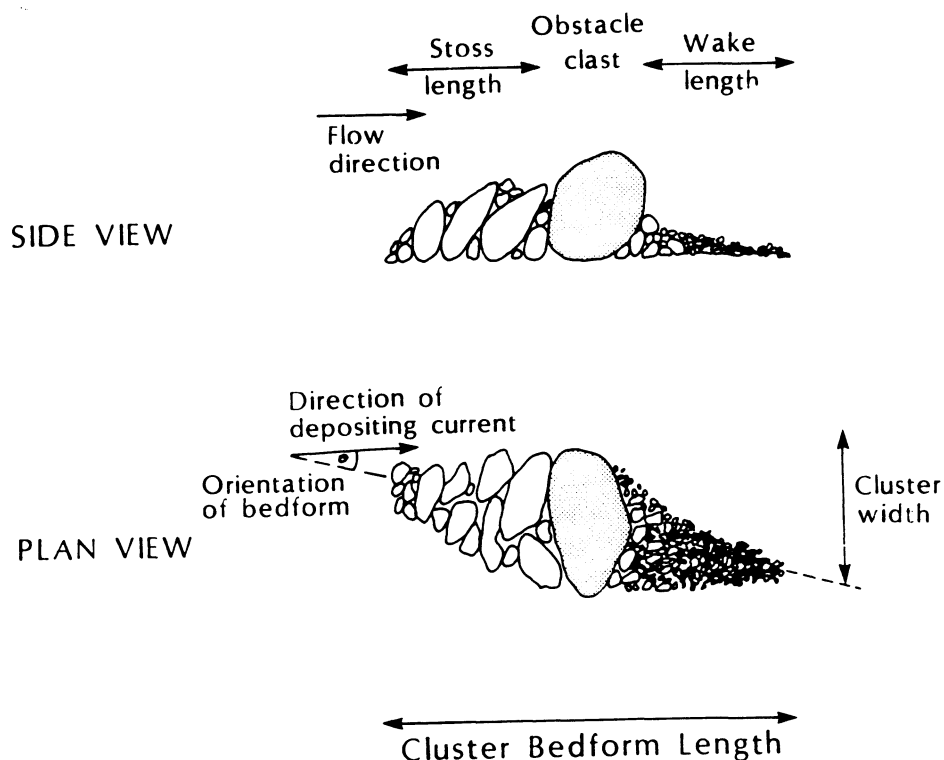
I den klassiske analysen av bunntransportprosessen (Du Boys, 1879; Meyer-Peter et al., 1934; Schoklitsch, 1934; Meyer-Peter & Muller, 1948; Einstein, 1950) ble det fokusert på betydningen av kritisk skjærstress for bevegelsen av bunnmaterialet. Bevegelsen ble betraktet som en funksjon av hydrauliske variable og kornstørrelse. Likningene ble utviklet ved laboratorieeksperimenter og feltmålinger. Einsteins likning skiller seg fra de andre tidlige likninger ved at den inneholder et stokastisk ledd som beskriver sannsynligheten for at partikler blir brakt i bevegelse.

Det ble observert at bunntransporten foregår diskontinuerlig og i bølger allerede i 30 årene av Muhlhofer og Ehrenberger, men de empiriske observasjonene ga ikke støtet til utviklingen av en fullstendig teori som beskriver disse fenomenene. Utviklingen fulgte i stedet den klassiske tilnæringsmåte (se Ergenzinger, 1988). Utviklingen av forskjellige kontinuerlige måleteknikker de siste 20 år bekrefter imidlertid observasjonene til Muhlhofer og Ehrenberger.



Figur 2. Diskontinuerlig bunntransport målt ved hjelp av hydrofoner i Erlenbach i Sveits (fra Banzinger & Burch, 1991).

Det eksisterer ikke en generell enkel sammenheng mellom flomvannføring og bunntransport (se f.eks Hayward, 1980; Klingemann & Emmet, 1982; Ergenzinger & Custer, 1983; Reid et al., 1985; Ergenzinger, 1988). Figur 2 viser diskontinuerlig bunntransport målt ved hjelp av akustiske sensorer i en bekk i Sveits. Et liknende bevegelsesmønster er også observert i forsøksrenner (Hubbel, 1987; Ashmore, 1991). Det er satt frem flere forskjellige teorier for å forklare fenomenet. Parker et al. (1982) og Gomez (1983) fant at utviklingen av dekklaget gjennom flommen påvirker raten av bunntransport ved at de minste partiklene skjermes mot skjærpåvirkningen fra vannstrømmen. Dekklaget har altså en avgjørende betydning for bunnmaterialets mobilitet. Reid & Frostick (1987) og Reid et al. (1992) fant at effekten av partikkelansamlinger (clusters på engelsk) og andre mikroformer på bunnen påvirker erosjonen og opptaket av partikler i strømmen. Partikkelansamling brukes som betegnelse på en liten bunnform der en eller flere større stein sperrer en ansamling av mindre partikler (figur 3). De fant også at det er betydelige forskjeller på bunnens sammensetning og på de kreftene som skal til for å bevege partikler ved starten og slutten av en transportepisode. For en videre innføring i sedimentologiske forhold i grus- og steinelver, prøvetaking og analyse se bl.a. Church & Jones (1982), Mosely & Tindale (1984) og Church et al. (1987).



Figur 3. Typiske elementer i en partikkelansamling (cluster) i en gruselv (fra Brayshaw, 1984).

Hassan & Reid (1990) fant et klart inverst forhold mellom raten av bunntransport og bunnens ruhet som skyldtes konsentrasjonen av partikkelansamlinger. Bunntransportens variabilitet blir også forklart ved endringer i løpets geometri dvs. varierende erosjon og sedimentasjon gjennom en flom (Ergenzinger, 1992; de Jong, 1995; Ashmore, 1991; Hoey, 1992; Goff & Ashmore, 1994) og bevegelsen av bunnformer nedover løpet (Gomez et al., 1989; Dinehart, 1989, 1992). Flere forfattere har fokusert på sedimenttilførselens rolle for variabiliteten i bunntransporten (Hayward, 1980; Harvey, 1987; Newson & Leeks, 1987; Pitlick & Thorne, 1987; Bathurst et al., 1990; Harvey, 1991; Nicholas et al., 1995). Pitlick & Thorne fant f.eks. at flommer fra intens regn eller snøsmelting var effektive i å transportere materiale ut i elva. Dette medførte at materialet ble tilgjengelig for transport ved mere moderate vannføringer.

En annen viktig debatt de siste tiårene har vært om alle partikler har lik mobilitet under en transportepisode eller om mobiliteten er avhengig av kornstørrelse, dvs. selektiv mobilitet. De fleste bunntransportlikninger baserer seg på en eller annen form for selektiv mobilitet og det er derfor et viktig felt innenfor bunntransportstudier og modellutvikling. Richards (1990) og Gomez (1995) gir en god oversikt over debatten. Parker et al. (1982) argumenterer for tilnærmet lik mobilitet fordi de mindre partiklene ikke er tilgjengelig for transport før dekklaget med grovere partikler er kommet i bevegelse. Det vil si at en terskelverdi for bevegelse av dekklaget må overskrides før en får transport av betydning. De grove partiklenes mindre mobilitet oppveies av en større tilgjengelighet for transport (Andrews & Parker, 1987). Parker et al. (1982) utviklet en modell på basis av dette og den er omtalt i kapittel 4. I et studie i Lyngdalselva i Norge og to elver i Skottland fant Ashworth & Ferguson (1989) ved hjelp av bunntransportmålinger og merkede sedimenter at bunnmaterialet har ulik mobilitet. I tillegg viste overflatematerialet en nedstrøms sortering som ikke kunne skyldes abrasjon. Hoey & Ferguson (1994) utviklet en numerisk modell for å beskrive nedstrøms sortering ved selektiv transport. Wathen et al. (1995) utførte feltmålinger som støttet modellen til Hoey & Ferguson (1994).

2. Søkemethodikk

Det er benyttet hovedsakelig to metoder for å finne litteratur om bunntransport i grus- og steinelver: et elektronisk søk på forskjellige databaser tilgjengelig via internett og en gjennomgang av referanselister til allerede tilgjengelig litteratur.

Det elektroniske søket ble utført av NTNU-Universitetsbiblioteket, IT-seksjonen på bestilling fra NVE. Følgende søkestrategi ble benyttet for å finne litteratur som omhandler gruselver og bunntransport: hovedsøkesettet (*Gravel bed or Gravelbed*) and (*River or Stream*), inkl. evt. flertallsendelser. Disse ordene måtte forekomme i hver referanse og ble kombinert med (*Sediment Transport or Bed Load or Gravel Transport*). Resultatet av kombinasjonen måtte videre inneholde minimum et av følgende underliggende emneordene: *sediment supply, measuring methods, monitoring, models, river regulation, hydropower developement, channelisation, gravel extraction, morphology, channel change, aggradation, degradation*. Databasene som ble søkt var GeoRef, Geobase, GeoArchive, SciSearch, Pascal, Ei Compendex, Fluidex, Biosis, Inspec, Energy SciTec, NTIS og CAB hos databaseverten DIALOG. En beskrivelse av databasene finnes på internettsidene <http://www.dialog.com/> og <http://www.krinfo.com/dialog/databases/netscape1.1/blf.html>.

Resultatet av søket var 467 titler. Av disse ble 92 titler funnet interessante. 44 av titlene var allerede funnet ved andre metoder og det ble bestilt sammendrag av 47 titler. Søkestrategien og listen over titler som ble funnet i søket og sammendrag som ble bestilt er samlet i HM-Notat 5/98 (Fergus, 1998).

3. Måling av bunntransport – metodikk

Bunntransporten i grus- og steinelver er svært vanskelig å måle. Det har vært forsøkt en rekke forskjellige metoder for måling av bunntransporten. Det kan skilles mellom direkte målemetoder og indirekte målemetoder. Ved direkte metoder prøver en å fange opp hele eller deler av materialet som ruller og glir langs bunnen eller registrere transporten til enkelte partikler eller alle partiklene i transport. Morfologiske metoder hvor en overvåker endringer i volumet av sedimenter i en definert tidsperiode hører til gruppen indirekte metoder. For andre oversikter og diskusjoner av målemetodikk se Long (1989) og Gomez (1987, 1991).

Radioaktive isotoper har også blitt benyttet for måling av bunntransporten i sandelver (Crickmore et al., 1990). Disse metodene er ikke omtalt her da de ikke egner seg på samme måte for måling av bunntransport i elver med grovt materiale.

I litteraturen over målemetodikk er det angitt flere forskjellige måter å oppgi volumet av bunntransporten på. Det mest vanlige er å oppgi bunntransportens volum per tidsenhet og det er vanlig å omgjøre dette til *transport pr. tidsenhet* dvs. $\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Dette gjør det enklere å sammenlikne verdier fra forskjellige vassdrag. På engelsk er dette *unit rate*, bare *rate* eller også *unit bedload discharge*. Med *sediment discharge* eller *bedload discharge* menes vanligvis volumet av transport eller bunntransport per tidsenhet gjennom en profil over løpet, dvs. den totale bunntransport per tidsenhet i elva. Med *bedload yield* menes det volumet av sediment som er flyttet over en viss tidsperiode, f.eks i løpet av en flom, transportsesong eller år. Et *sedimentbudsjett* vil si et budsjett over tilførsel, erosjon og lagring for et område i løpet av en viss tidsperiode.

3.1. Direkte målinger av bunntransporten

Kurvprøvetakere

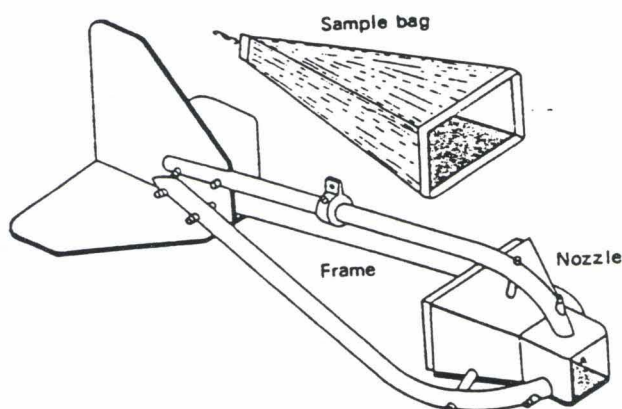
Kurvprøvetakere er den mest utbredte målemetoden for direkte måling av bunntransporten. Metodikken og prøvetakere ble utviklet i mellomeuropa for bruk på Rhinen og Donau på begynnelsen av 1930 tallet (Ehrenberger, 1931 og Muhlhofer, 1933 – referert i Ergenzinger, 1988). En annen type prøvetaker (Arnhem måleren, referanse i Hubbel, 1987) ble utviklet i Nederland på slutten av 1940 årene og videreutviklet i USA på begynnelsen av 1970 tallet (Helley & Smith, 1971). En kurvliknende prøvetaker senkes ned i strømmen på bunnen av elveløpet over en viss tidsperiode og fanger opp materiale. For å måle bunntransporten over

elveløpet må prøvetakeren plasseres i flere punkter i et tverrprofil. Resultatene må interpoleres for å få total bunntransport gjennom måleprofilen. Ved å plassere en prøvetaker på bunnen kan man forandre hastighet og retning på strømmen og dermed også sedimenttransporten. Prøvetakere må derfor kalibreres for å finne deres hydrauliske effektivitet og prøvetakingseffektivitet. Med hydraulisk effektivitet menes forholdet mellom hastigheten på vannstrømmen utenfor prøvetakeren og vannets hastighet inn i prøvetakeren. Med prøvetakingseffektivitet menes den andel av den faktiske bunntransport over det arealet som prøvetakeren dekker som den klarer å fange opp. Man kan skille mellom enkle kurvprøvetakere (Muhlhofer) og trykkdifferanse (pressure-difference) prøvetakere (Arnhem, Helley-Smith). Trykkdifferanse prøvetakere er konstruert slik at vannets hastighet inn i måleren skal være tilnærmet lik vannets hastighet i elva. Dette oppnås ved at utgangen av åpningen til prøvetakeren er større enn inngangen. Dette fører til at trykket reduseres inne i prøvetakeren og hastigheten til vannet som strømmer inn i prøvetakeren ikke reduseres. Kurvprøvetakere er egnet for bruk i store vassdrag så vel som i mindre.

I sin doktoravhandling ved NTH, Institutt for Vassbygging brukte Bulgurlu (1977) to forskjellige kurvprøvetakere i Gaula (Muhlhofer og Arnhem prøvetakere). Han foretok også en kalibrering av Arnhem måleren i det hydrotekniske laboratoriet på NTH. Han fant at effektiviteten (hvor stor andel av bunntransporten måleren faktisk fanger opp) varierte fra 17% til 78 % og var avhengig av retningen til prøvetakeren langs bunnen, kornstørrelsen til det bunntransporterte materiale og vannets hastighet. Måleren fungerte best ved lave vannføringer der bunntransporten var liten. Muhlhofer måleren ble ikke kalibrert og effektiviteten ble satt ved å bruke kalibreringer gjort av andre forfattere, men Burgurlu beskriver erfaringene med denne måleren. I tillegg til kurvprøvetakere brukte Burgurlu også rørformede feller for å studere det bunntransporterte materialets sammensetning. Arnhem måleren har siden vært i bruk ved NHL/ SINTEF (pers. medd. Einar Tesaker) men det er ikke publisert flere måletekniske rapporter om kurvprøvetakere i Norge.

Effektiviteten til enkle kurvprøvetakere (av Muhlhofer typen) ble testet og kalibrert av Engel & Lau (1981). De fant at effektiviteten varierte med hvor full prøvetakeren var, vannets hastighet og dimensjonen på prøvetakeren. De anbefaler kalibreringskurver og ikke bruk av en fast effektivitet for alle vannføringer. Testene omfattet ikke grovt materiale.

Helley-Smith måleren er den mest utbredte kurvprøvetakeren som er i bruk i dag. Den ble utviklet av U. S. Geological Survey på begynnelsen av 1970 tallet (Helley & Smith, 1971) (figur 4). Helley-Smith er en trykkdifferanse prøvetaker og er en modifisert versjon av Arnhem prøvetakeren. Prøvetakeren består av en firkantet åpning som utvides bakover, en pose til å fange sedimentene i og en ramme med halefinner. Diameteren på åpningen er 7.62 cm og forholdet mellom utgangen og åpningen er 2.5. Det er laget en større versjon med en åpning på 15.1 cm. Sedimentene ledes inn i en gjennomtrengelig pose med maskevidde 0.25 mm. Kuhnle (1992) og Kuhnle et al. (1988) beskriver en modifisert Helley-Smith (MHS) prøvetaker. Åpningen er modifisert fra en firkant til en trapesoide for bruk i et V-formet forsøksrenne konstruert slik at strømmingen er superkritisk. Åpningen på prøvetakeren er utformet slik at det ikke er noen mellomrom mellom rennet og åpningen. Arealet på åpningen til prøvetakeren er den samme som i den firkantede versjonen.



Figur 4. Helley-Smith prøvetakeren (fra Emmet, 1981).

I en studie i elven Muese i Nedeland har Duizendstra & Nieuwenhuijzen (1995) brukt et videokamera festet til Helley-Smith prøvetakeren. Dette gjorde det mulig å tilpasse prøvetakingstiden til den observerte transport og avgjøre om prøvetakeren var feilplassert på bunnen.

Helley-Smith prøvetakeren er blitt kalibrert i laboratorium av Druffel et al. (1969). Emmet (1980) kalibrerte Helley-Smith prøvetakeren i East Fork River i Wyoming, USA ved hjelp av en forsøksrenne der bunntransporten ble registrert ved kontinuerlige innsamling og veiing. Emmet gir også en innføring i bruken av prøvetakeren. Prøvetakeren ble funnet til å være 100% effektiv til å fange materiale mellom 0.5 – 16 mm, men 175 % effektiv for materiale mellom 0.25-0.50 mm, antageligvis på grunn av at den også fanger suspendert materiale. For partikler større enn 16 mm fant han at prøvetakeren var 70% effektiv. I tillegg fant han at

effektiviteten til prøvetakeren ble redusert med økende transport. Han anbefaler at målinger i store elver ikke foretas mer enn 15 m fra hverandre eller at seksjoner mellom målepunkter ikke dekker mer enn 15% av den totale bunntransporten. Hubbell et al. (1985) og Hubbell (1987) foreslår en annen metode for kalibrering og bruk av prøvetakeren på bakgrunn av bunntransportens store variabilitet i tid. Laboratorieundersøkelser viser at effektiviteten til prøvetakeren varierer med mengden av transport og partikkelstørrelse. Denne variasjonen er størst for de største transportmengder og partikkelstørrelser. Den største prøvetakeren krever større justering i forhold til kalibreringskurven enn den mindre. Nøyaktigheten blir også påvirket av bunntransportens variabilitet i tid. Feilestimatet kan imidlertid reduseres betraktelig ved å øke antall ganger man tar prøver over et profil. I løp hvor bunntransporten varierer lite på tvers av løpet kan antall prøvepunkter reduseres og dette kompenseres ved å øke antall ganger man krysser løpet under en prøvetaking. I vassdrag med stor lateral variasjon i bunntransporten og med grovt materiale må man imidlertid ta mange prøver både over løpet og i tid for å få et minst mulig feilestimat.

Helley-Smith prøvetakeren har vært i bruk i Norge siden begynnelsen av 1980 tallet og har vært brukt ved Geografisk institutt, Universitetet i Oslo (f.eks. Engen, 1981; Bogen, 1983; Elster, 1987). Helley-Smith prøvetakeren brukes i dag av Norges vassdrags- og energiverk i en rekke vassdrag bl.a. i Sogna på Romerike (Bønsnes & Bogen, 1995) og i AASER prosjektet (Brittain & Saltveit, 1997). I dette prosjektet inngår samtidige målinger i en rekke europeiske vassdrag. I Norge måles Bayelva på Svalbard og Oldenelv.

En annen type kurvprøvetaker er beskrevet av Bunte (1990, 1992). Prøvetakeren består av en ramme med et nett med maskevidde 10 mm festet bak. Rammen har en åpning på 1.6 x 0.3 m og er konstruert for å ta store prøver av grovt materiale (grus og stein) i transport. Den har bare vært brukt i forskningsøyemed i et lite vassdrag.

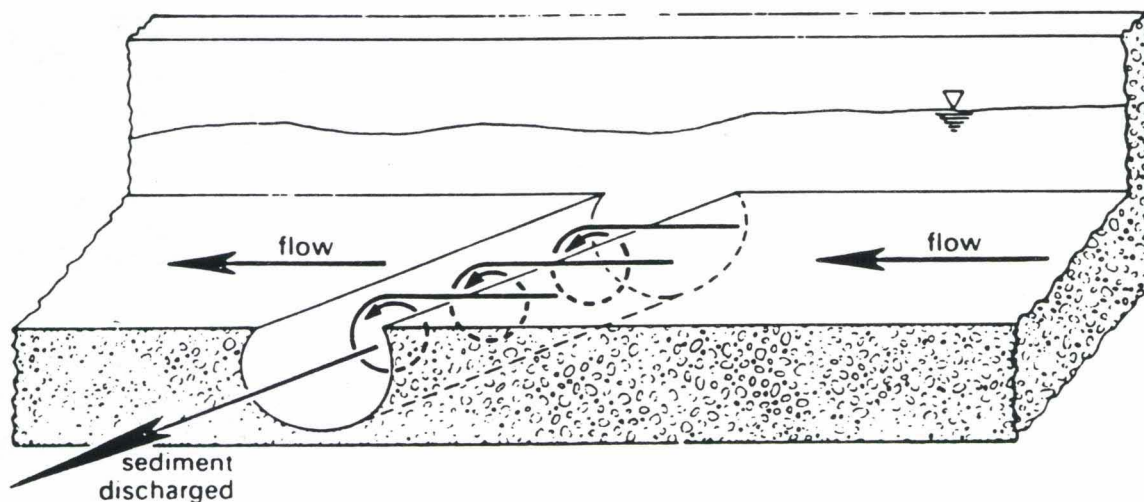
Feller

Bunntransportfeller er beholdere eller renner som graves ned i bunnen av løpet slik at åpningen er i nivå med overflaten på bunnen. Sedimenter som ruller eller glir over bunnen faller ned i beholderen eller rennen og etter en viss tid kan innholdet i beholderen analyseres. Denne målemetoden forstyrrer den naturlige strømming i løpet minimalt. Dersom åpningen på beholderen er stor og sedimentene ikke transporteres kontinuerlig ut av beholderen kan imidlertid de finere fraksjoner bli vasket ut igjen. Fine fraksjoner vil også ha en tendens til å

holde seg mer eller mindre svevende ved høye vannføringer og dermed føres forbi feller på bunnen. Denne metoden gir derfor en underrepresentasjon av de minste fraksjoner.

Kontinuerlig måling av bunntransporten over hele elveløpet er ressurskrevende og har bare blitt foretatt noen få steder i verden. Bunntransporten må samles over hele løpet, veies og helst kornfordeles. For å få et best mulig bilde av bunntransportens variasjon i tid må tidsoppløsningen være så liten som mulig.

Det er blitt bygget anlegg med virvelfeller (vortex tube) – i Oak Creek, USA (Klingeman & Milhous, 1970) i Torlesse Creek, New Zealand (Hayward & Sutherland, 1974; Hayward, 1980), i Flynn Creek, USA (O'Leary & Beschta, 1981) og i Italia (Tacconi & Billi, 1987). Modellen til slike feller kom fra anlegg som ble bygget for å hindre bunntransport inn mot irrigasjonskanaler (Hayward, 1980). Et virvelfelle-anlegg består av en kanal som vannet og sedimentene ledes inn i. Sedimentene som ruller og glir langs bunnen av kanalen fanges opp i en rund renne som er plassert skrått på tvers av kanalen og som heller svakt nedover (figur 5).



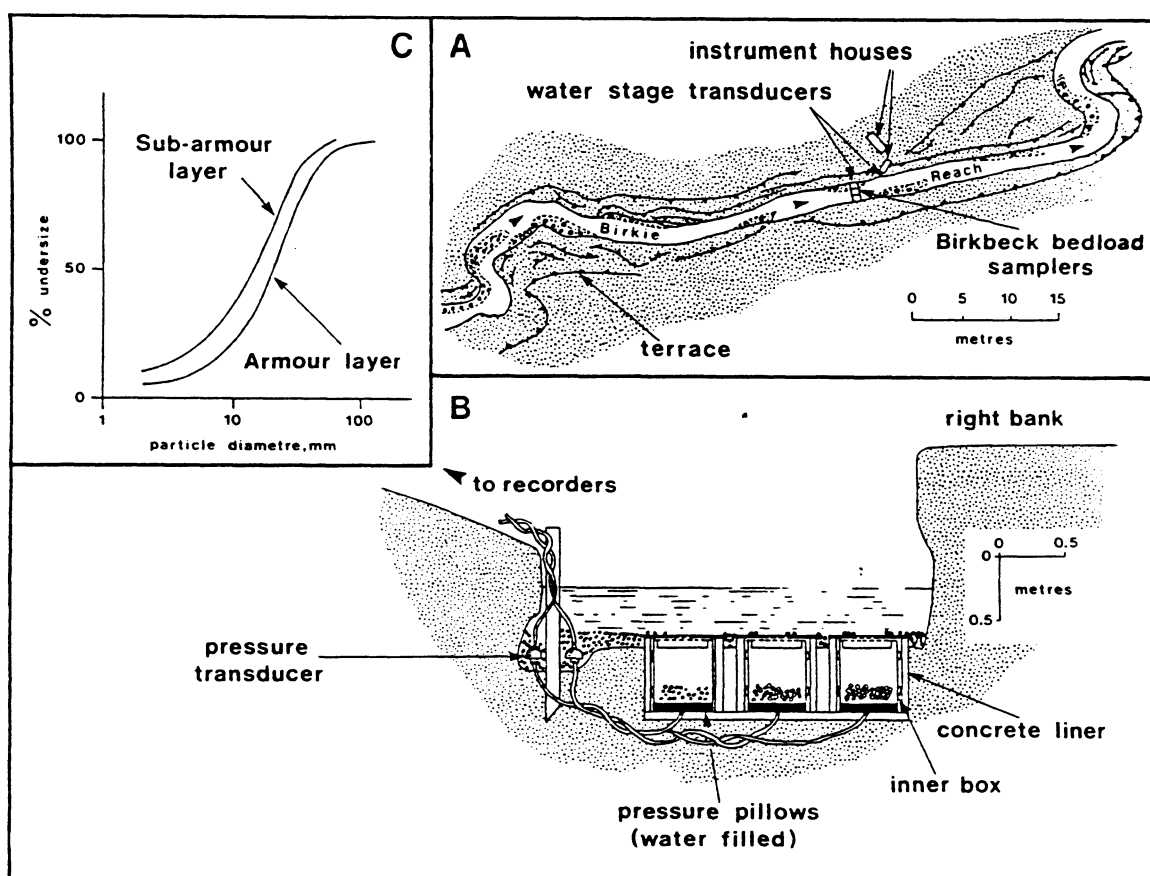
Figur 5. Prinsippskisse av et virvelfelle anlegg (fra Hayward, 1980).

Det oppstår en virvelstrøm inne i renna som transporterer sedimentene ut av renna og mot et apparat for kontinuerlig veiing og prøvetaking for kornfordeling. Disse anlegg er i stand til å måle bunntransporten kontinuerlig over en flomepisode. Klingeman & Emmet (1982) rapporterer at metoden er 100 % effektiv for grove partikler ved alle vannføringer men at fine partikler er underrepresentert ved høye vannføringer. Opplegget er imidlertid 100 % effektivt også for fine partikler ved lave vannføringer. Virvelfelle-anleggene har gitt verdifull data og

kunnskap om bunntransportens volum, intensitet og prosesser og disse er spesielt velegnet for måling av grovt materiale. Slike anlegg er imidlertid dyre å bygge og er ikke helautomatiske i drift og krever bemanning under målesituasjoner.

En annen kontinuerlig måleopplegg med en samlebånd i en renne over hele løpet ble bygget i East Fork River i USA (Emmet, 1980; Klingeman & Emmet, 1982). Dette systemet ble brukt til å kalibrere Helley-Smith prøvetakeren og Parker et al. (1982) brukte data fra måleprogrammet for å utvikle en matematisk modell for bunntransporten.

Feller som samler opp bunnmaterialet og som bruker trykkputer til å registrere endringer i mengde sediment i transport ble først brukt i Storbritannia (Reid et al. 1980, Reid & Frostick, 1987). De kalles ofte for feller av Birkbeck-typen etter stedet de ble utviklet. Figur 6 viser en skisse av slike feller. De har også vært brukt i USA (Kuhnle et al. 1988), Israel (Laronne et al. 1992a) og Østerrike (Habersack, 1994).



Figur 6. Bunnfeller av Birkbeck-typen (fra Reid, 1986).

Et slikt system er godt egnet i områder som er vanskelig tilgjengelig og som har et lite forutsigelig flom regime (Laronne et al. 1992a). En begrensning på slike systemer er deres kapasitet. Dersom de ikke er dimensjonert store nok kan de fylles opp i løpet av en flom og verdifull informasjon om hele forløpet av flommen gå tapt (Laronne et al. 1992a). Slike feller egner seg godt for måling av grovt materiale. De er i likhet med virvelfelle anleggene dyre å etablere, men er til gjengjeld helautomatiske så lenge fellene ikke er fulle. Ettersom fellene ikke tømmes kontinuerlig gjennom en flomepisode er det ikke mulig å få et bilde av hvordan kornstørrelsen på bunntransporten varierer gjennom en flom. Dimensjonene på fellene varierer fra studie til studie. Fellene har en smal åpning som kan reguleres og dette forhindrer tap av mindre fraksjoner. Feller er også blitt brukt for å undersøke det bunntransporterte materialets sammensetning (Burgurlu, 1977; Frostick et al., 1984).

I norske brevassdrag med stor materialtransport har det vært forsøkt to metoder for å fange opp det bunntransporterte materiale. Det ble satt opp et nett over breelva foran Nigardsbreen som fanget bunnmateriale i nær en måned før den brøt sammen på grunn av presset fra isfjell (Østrem et al. 1970). I Visa som er en sideelv til Bøvra ble det lagt opp en dam ca. 50 m bred og ca. 70-80 m lang som ble nivellert på begynnelsen av målesesongen i 1974 og så nivellert igjen 8 ganger i løpet av sesongen (Kjeldsen, 1975). Man hadde også problem med dambrudd i dette prosjektet. Målingene fortsatte i 1975 og det ble nivellert 5 ganger i løpet av målesesongen (Kjeldsen, 1977). NVE har foretatt oppmålinger i en dam i Fokså på Dovre siden 1992. Dammen tømmes etter hver oppmåling og innløpet er forsterket for å hindre erosjon oppstrøms. Dammen har blitt tømt tre ganger hittil. Målinger med nett og i dam er relativt enkelt. Oppløsningen på målingen av transporten er avhengig av hvor ofte og hvor nøye en kan nivellere akkumulasjonen bak nettet eller i dammen.

Merking og registrering av sedimenter

Denne metoden egner seg godt for grovt materiale. Man kan utnytte naturlige forekomster av magnetisme eller jerninnhold og registrere passasjen av sedimenter forbi et punkt. Man kan også selv merke sedimenter på forskjellig vis, plassere dem i elveløpet og registrere bevegelsen. Dette kan enten gjøres kontinuerlig eller ved å finne dem igjen etter en transportepisode. Denne metoden er godt egnet for prosess studier der en ønsker kunnskap om transportmønstre (hvor og når sedimentene beveger seg og hvordan forskjellig formede partikler beveger seg – se f.eks Schmidt & Gintz, 1993) og hvordan bunnforholdene påvirker bunntransporten (forekomsten av partikkelansamlinger, dybden på dekkskiktet,

kornfordelingen, osv.). Det er store variasjoner i metoder og teknikker. Prosedyrer og teknikker involvert er utvelgelse og merkingen av partikler, tilbakeføring og plassering i løpet og gjenfinning eller registreringsmetode (Long, 1989). Man kan skille mellom kontinuerlig registrering av merkede partikler i transport og registrering av merkede partikler etter transport (gjenfinning). Registrering av merkede partikler etter transport kan strengt tatt ikke kalles en direkte metode for måling av bunntransporten men er tatt med i dette avsnittet fordi det hører hjemme under gruppen merking av sedimenter. Hassan et al. (1984) og Hassan & Church (1992) gir en oversikt over studier som har benyttet merkede partikler og andelen av sedimenter gjenfunnet i de forskjellige studier. Hassan & Church (1992) benytter data fra mange forskjellige studier til å analysere bevegelsen til enkelte partikler.

Den enkleste metoden for merking av sedimenter er maling og nummerering. De merkede partikler plasseres ut i løpet og gjenfinnes visuelt etter en viss tid, eller etter en eller flere transportepisoder. Dette er blitt gjort mer eller mindre kontinuerlig i en lang rekke studier siden Leopold et al. (1964) utførte dette første gang. Denne metoden er blitt benyttet av flere hovedoppgaver ved Geografisk Institutt, Universitetet i Oslo (f.eks. Karlsen, 1971, Fergus, 1993). Fordelen med denne type merking er at det er enkelt og billig og mange partikler kan derfor merkes på denne måten. Kondolf & Matthews (1986) brukte hvite dolomittpartikler som ble erodert fra en brofylling til å studere transportmønstre i en elv i California. Visuelle gjenfinningsmetoder er imidlertid bare begrenset til overflaten av løpet og merkede sedimenter som blir begravet kan ikke gjenfinnes. Andelen merkede sedimenter som gjenfinnes er som regel lav (middel på ca. 30%) og varierer med kornstørrelse, størrelsen på transporthendelsen og bunnens karakteristika (Hassan et al., 1984). Denne metoden egner seg godt for studier av f.eks. bevegelsen av partikkelansamlinger på banker (se for eksempel de Jong, 1995) og studier der en ønsker å undersøke mobiliteten til overflatelaget på en enkel måte.

Det er utviklet flere metoder for å merke sedimenter på en slik måte at de kan gjenfinnes nede i bunnsedimentene. Partikler kan merkes med metall (Butler, 1977, Schmidt & Ergenzinger, 1992, Reid et al., 1984), magneter (Ergenzinger & Conrady, 1982; Hassan et al., 1984; Hassan et al., 1992; Laronne & Duncan, 1992; Schmidt & Ergenzinger, 1992, Schmidt & Gintz, 1993 og Gintz et al. 1996), ved forsterkning av naturlig magnetisme (Oldfield et al., 1981; Reid et al., 1984) og radiosendere (Ergenzinger et al., 1989, Ergenzinger & Schmidt,

1990; Chacho et al. 1994). Radiosendere er også blitt brukt av NVE i Veitastronðselvi i Sogn og Fjordane (Bogen & Kennet, 1991).

Transporten av merkede partikler kan registreres forbi et punkt eller både registreres og følges. Ergenzinger & Conrady (1982) brukte en elektromagnetisk detektor for å registrere passasjen av partikler merket med magneter og Ergenzinger & Custer (1983) brukte denne metoden for å registrere passasjen av naturlig magnetiske partikler forbi detektoren og kalibreringen av systemet er nøye beskrevet her. Denne metoden gir mulighet for å studere transportprosesser slik som initiering og slutt på transportepisoder og intensiteten på transporten. Det har også potensiale til å kunne brukes til måling av transportvolumer dersom det er mulig å kalibrere systemet. Mer om denne metoden og flere resultater er publisert i Custer et al. (1987). Et system med radiosendere i stein og mottager som registrerer bevegelsen av merkede partikler er blitt utviklet av Ergenzinger et al. (1989), Ergenzinger & Schmidt (1990) og Chacho et al. (1994). Ergenzinger & Jupner (1992) har utviklet en kunstig stein med fem trykksensorer som sender data direkte til datamaskinen via et radio og antenne system. Denne er blitt brukt til å studere løft- og skjærkreftene som virker på en partikkel i strømmende vann.

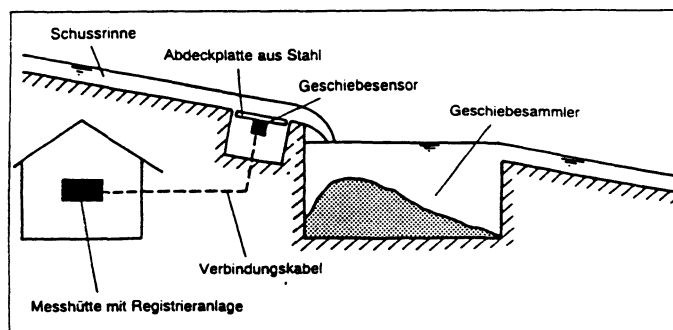
3.2. Indirekte metoder

Akustiske metoder

Det er mulig, ved hjelp av geofoner eller hydrofoner, å 'lytte' til bunntransporten. Man må finne en sammenheng mellom bunntransporten, og intensiteten og frekvensen av lyden som produseres av kollisjoner mellom partikler (Tywonuik & Warnock, 1973) eller partikler og en plate eller rør på bunnen av løpet. Fordelen med akustiske metoder er at man ikke forstyrrer bunnen eller bunntransporten slik som f.eks. kurvprøvetakere. Man kan også måle transporten kontinuerlig og automatisk. Ifølge Richards & Milne (1979) ble akustiske metoder brukt første gang av Muhlhofer i 1933. Flere eldre referanser er oppgitt i Tywonuik & Warnock, (1973). Tywonuik & Warnock (1973) beskriver et system med hydrofoner og kalibreringen av dette systemet. De konkluderer med at systemet kan brukes til kontinuerlig registrering av bevegelsen ved bunnen og til å innhente kvalitative data slik som *når* og *hvor* det foregår bunntransport. Systemet de beskriver kan ikke kvantifisere mengden bunntransport og kornstørrelser. Problemer de nevner er blandinger av kornstørrelser i transport, lyd generert av stømmning forbi hydrofonen og storskala turbulens. Richards & Milne (1979) beskriver

kalibrering av et system i felt og laboratorie og fant at det kunne brukes til å identifisere en terskel for transport, intensiteten til bevegelsen av sand og variasjonen av transporten i tid. De fant imidlertid at det er vanskelig å kalibrere systemet for å finne raten av transport.

Bunntransport i to bratte bekker i Sveits blitt målt ved hjelp av hydrofoner installert under en metallplate som er bygget inn i en sedimentasjonsdam (Banzinger & Burch, 1990; Spreafico & Lehmann, 1994; Rickenmann, 1994, 1997). Antall registrerte impulser over platen i løpet av en viss tid er et mål på intensiteten på bunntransporten. Kalibreringen av systemet er beskrevet i Rickenmann (1997). Figur 7 viser et slikt system.



Figur 7. *Prinsippskisse av måleanlegg for bunntransport ved hjelp av hydrofoner (fra Banzinger & Burch, 1990).*

I Italia er seismiske detektorer blitt installert i forsøksfelt i sammenheng med en sedimentfelle for å måle bunntransport (Govi et al., 1993). De installerte geofoner langs vassdraget og noen nedgravd i selve løpet. De fant at plassering av geofonene hadde stor betydning for målingene og at de nedgravd i vassdraget var godt egnet for å måle forløpet av bunntransporten gjennom en flom. Arratano & Moia (under trykking) har brukt geofoner i et lite vassdrag i Italia for å registrere passasjen av et flomskred. Itakura et al. (1994; 1996; 1997) beskriver et system med en mikrofon plassert i et rør i bakken som brukes til å bestemme forekomsten av flomskred og pyroklastiske strømmen i Japan. Mikrofonen fanger opp lydsignaler i bakken generert av lyden av steiner som ruller. Forekomsten bestemmes ved å registrere om lyden er over en viss terskel eller ikke. Et liknende system med geofoner i USA er beskrevet av Lahusen (1996).

Morfologiske metoder

Ved å måle endringen av volumet av sediment lagret over en viss tidsperiode kan man beregne sediment transporten. Denne metoden blir brukt i Kina's store elver og er beskrevet av Long (1989) og Huang (1992). Faste profiler blir målt, oppmålingen repeteres og

bunntransporten beregnes ved hjelp av kontinuitetslikningen utfra bevegelsen av bankene. Profilene blir oppmålt ved hjelp av ekkolodd og kan foretas enten langs elva eller på tvers av løpet. Denne metoden egner seg godt i sandelver hvor bunntransporten foregår ved at hele banker beveger seg nedover løpet i løpet av en transportepisode. Ekkolodd har også blitt benyttet av Dinehart (1989, 1992a, b) for å måle endringer av løpet over en profil i løpet av en transportepisode i en elv med grovt materiale. Han fant endringer i bunnens høyde i løpet av transportepisoden og at fluktuasjoner i vannspeilet korresponderte til bevegelsen av bunnformer gjennom løpet. Han brukte imidlertid ikke metoden til å beregne bunntransport gjennom løpet. Kondolf & Mathews (1986) beregner bunntransporten ved hjelp av en enkel likning hvor bunntransporten er en funksjon av hastigheten til merkede sedimenter og dybde og bredde på det bevegelige laget. Laronne et al. (1992b) bruker kontinuitetslikningen sammen med målinger av pålagring og erosjon før og etter en flom i tillegg til merkede sedimenter for å beregne bunntransport volumer i Australia. Pålagring og erosjon ble målt ved hjelp av kjettinger som ble plassert vertikalt og forankret nede i bunnsedimentene og transport distanse ble målt ved hjelp av partikler merket med magneter. Likningen de bruker til å estimere *middel bunntransport volum* er denne:

$$V_b = L_b(A_s + A_f)/2 \quad (1)$$

Hvor L_b er middeldistanse til bunntransporten og A_s og A_f er middelarealet av pålagring og erosjon i et profil. Problemer med denne metoden er stor variabilitet i transportdistanse til de merkede partikler. Denne variabiliteten kan minskes ved å øke antall merkede partikler men dette øker kostnaden ved metoden. En fordel ved metoden er at den ikke krever en observatør tilstede under flomsituasjoner og at flere deler av løpet kan måles under samme flomsituasjon. Flere forfattere har benyttet kontinuitetslikningen for å beregne bunntransporten. Ferguson & Ashworth (1992) og Goff & Ashmore (1994) har brukt tverrprofiler for å estimere bunntransportrater over korte tidsrom. Martin & Church (1995) bruker samme tilnærming med kontinuitetslikningen for å beregne et *sediment budsjett* for Vedder elva i Canada over lang tid. De bruker endringer i tverrprofiler målt ved tradisjonelle metoder (landmålingsdata med en tidsoppløsning på et og tre år) og målte bunntransport volumer som inngangsdata. Problemer som nevnes med metoden er at materiale kan transporteres inn i løpet, sedimenteres for så å eroderes og transporteres videre ut av løpet i perioden mellom målinger. Dette gjør at verdiene som blir beregnet må betraktes som minimumsverdier for bunntransport. Fergus (1997) har brukt profildata fra Fortunelva i Norge for å beregne

sedimentasjons- og erosjonsrater over lang tid (17 og 5 år). Lane (1997) fant en sterk positiv korrelasjon mellom volumet av vann som passerer gjennom løpet på et tidlig tidspunkt i flomhydrografen og volumet av erosjon og bruker dette til å beregne transportkapasitet og potensielle transportvolumer.

NVE har målt opp profiler på deltaet i Nigardsbrevannet hvert år siden 1968 og brukt disse til å beregne bunntransport fra breen (Kjeldsen, 1975; Østrem, 1988). En oppsummering av måleserien er også gitt i Hallet et al. (1996). På grunnlag av data fra deltaet i Nigardsbrevannet er det funnet en sammenheng mellom bunntransport og suspensjonstransport i breelver som kan anvendes til å estimere bunntransporten i brevassdrag uten målinger (Østrem, 1975; Bogen, 1989).

Fordelene ved å bruke morfologiske metoder er at kostnadene er lave og at de samme dataene kan brukes til flere formål og at dataene gir et bilde av hele løpet og er ikke bare punktverdier.

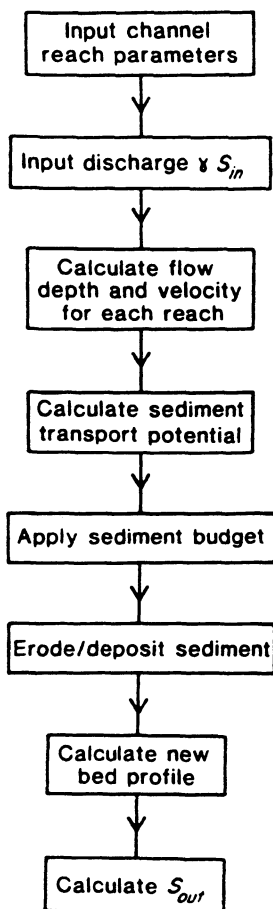
4. Modeller

Dette kapitlet tar for seg både enkle bunntransportlikninger som beregner bunntransporten og sammensatte modeller som inkluderer beskrivelser av flere av prosessene ved bunntransport og som beskriver en geometrisk eller sedimentologisk utvikling av elveløpet.

Med sedimenttransport modeller menes matematiske modeller som beskriver en begrepsmessig formulering av transportprosessen (Pickup, 1988). Man kan skille mellom enkle bunntransportlikninger som bygger på et spesifikt forhold mellom vannføring (el. l. hydrauliske variable) og bunntransporten og mer kompliserte sammensatte modeller som også tar for seg prosesser i dekklaget, sedimentasjonsprosesser og som f.eks router sedimentene nedover løpet. Sedimenttransport er et av de mest kompliserte geomorfologiske prosesser å modellere - man skal beskrive bevegelsen av et to-fase system av vann og sedimenter, svært forskjellige tilstander (ingen transport, kun enkelte partikler i transport og opptil fullstendig bevegelse av hele bunnen) og i tillegg kornstørrelser som varierer fra leirpartikler til små blokker (Naden, 1988). Transportprosessen består av en initiering av bevegelse som involverer prosesser i og under dekklaget, bevegelsen av partikler nedover løpet med strømmen og sedimentasjon av partiklene. En rekke forhold påvirker mengden av sediment som transporteres og dette kan variere sterkt fra elveløp til elveløp og innenfor korte avstander i samme løp. Slike forhold er imbrikasjon og mikrostrukturer i dekklaget, f.eks partikkelansamlinger og endringer i dekklaget gjennom en flom (Parker et al., 1982; Gomez, 1983; Reid & Frostick, 1987; Hassan & Reid, 1990; de Jong, 1995), løpsendringer under transportepisoden (Ergenzinger, 1988; Ashmore, 1991; Hoey, 1992) og sediment tilførsel (Pitlick & Thorne, 1987; Harvey, 1987). Flere forfattere (Ergenzinger, 1988; Naden, 1988; Gomez & Church, 1989; Gomez, 1991) har også påpekt at vanskelighetene med å måle bunntransporten nøyaktig og kontinuerlig skaper problemer i utviklingen og verifisering av modeller. Det blir vanskelig å vite om man modellerer faktiske prosesser eller feil som er introdusert av målemetodikken. Dette gjenspeiler seg også i at de fleste modeller er utviklet for bruk i elver med sand og fin grus og at det er få som er utviklet i, og egner seg i vassdrag med grovt materiale. Et problem som også må nevnes er at alle modellene er utviklet på basis av empiriske observasjoner og nesten utelukkende med data fra forsøksrenner. Selv om likningene representerer fysiske prosesser er deres koeffisienter og eksponenter empiriske, og likningene virker best under forhold som likner de hvor de empiriske bestandeler av likningen

ble bestemt (Bathurst et al., 1987). Det er derfor nødvendig å kjenne bakgrunnen til likningen godt før en velger å bruke den på en bestemt problemstilling.

Dette kapittelet omhandler modeller som er utviklet for bruk i elver med grovt materiale, og spesielt de likningene som er testet og omtalt i review-artikler og de som er programmert for bruk i kommersielt tilgjengelige modeller slik som HEC-6 og MIKE-11. Figur 8 viser en generalisert diagram som viser de forskjellige trinn i modelleringen av bunntransporten.



Figur 8.

Et generalisert diagram som viser de forskjellige trinnene i modelleringen av bunntransporten (fra Naden, 1988).

4.1. Bunntransportlikninger

Gomez (1991) gir en god historisk framstilling av utviklingen av bunntransportlikninger og modeller. Flere forfattere har testet og vurdert de forskjellige likningene. Bathurst et al. (1987) testet 6 likninger som beregner den totale bunntransport (bedload discharge) og en som beregner initiering av transport. De bruker data fra bratte forsøksrenner og elver med grovt bunnmateriale og vurderer likningene i forhold til deres egnethet i bratte vassdrag (gradient fra 0.1 til 10 prosent eller mer) med grovt materiale. Gomez og Church (1989) har testet 12 likninger med uavhengige data fra både felt og laboratorieforsøk og gir en grundig vurdering

av likningene. De presenterer også en tabell som oppgir kornstørrelsene som er brukt i utviklingen av likningene. Begge studier beregner et feilestimat for transportberegningene til hvert enkelt likning. Burgurlu, (1977) utførte også beregninger av bunntransporten med 7 forskjellige likninger og sammenlignet disse med en transportkurve basert på hans observasjoner i Gaula. De mest brukte likninger er også testet av ASCE (1971) og er presentert i boka *Sedimentation Engineering* (ASCE, 1975). Chang (1988) gir også en god oversikt og presentasjon av de mest vanlige likningene.

Felles for testene av transportlikningene er de nedslående resultatene. Hos Burgurlu (1977) er avikene fra transportkurven opptil 115 %. De beste resultatene han oppnår er et avvik på 31% over transportkurven med Kalinske (1947) og 26.3 % mindre for Meyer-Peter & Muller (1948) likningen. Han fant også at likningene ga transport først ved høye vannføringer selv om bunntransport påviselig fant sted ved lavere vannføringer. Det samme fant Gomez & Church (1989) i sine tester. Ingen av likningene i Gomez & Church sin test opptrådte konsistent eller var i stand til generelt å beregne bunntransporten i naturlige gruselver.

Bunntransportlikninger er basert på at det finnes et spesifikt forhold mellom hydrauliske og sedimentologiske variable og bunntransporten. Gomez & Church (1989) skiller mellom fire forskjellige prosedyrer for beregningen av bunntransport. Beregningene kan være basert på: 1) skjærspenning 2) vannføring 3) stokastiske funksjoner eller 4) energibetraktninger (på engelsk 'stream power' - $\chi Q S$). Prosedyrene som baserer seg på vannførings- eller energibetraktninger kan egentlig sies å tilhøre samme gruppe og Einsteins (1950) stokastiske metode er basert på kritisk skjærspenning. Chang (1988) skiller mellom tre forskjellige prosedyrer (skjærspenning, energibetraktninger og en tredje gruppe han kaller parametrisk). Den parametriske innebærer bruk av Colbys relasjoner (se Chang, 1988). Chang inkluderer Einsteins (1950) stokastiske tilnærming i skjærspenning gruppen. Eksempler på likninger som tilhører vannførings-, skjærspennings- og energibetrakningsgruppen er gitt ved likning (2) Schoklitsch (1934), (3) Meyer-Peter & Muller (1948) og (4) Bagnold (1980).

Schoklitsch, 1934:

$$i_b = \sum_{i=1}^n P_i (7000 S^{3/2} / D_i^{1/2}) [Q - (1.944 \times 10^{-5} D_i / S^{4/3})] \quad (2)$$

Meyer-Peter & Muller, 1948 (som skrevet i Bathurst et al. (1987) .

$$\frac{q_{sb}}{[g(\rho_s / \rho - 1)D^3]^{1/2}} = 8 \left[\left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} \tau_* - \tau_{*c} \right]^{3/2} \quad (3)$$

Bagnold, 1980 (som skrevet i Gomez & Church, 1989)

$$i_b = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} i_{br} \left[\frac{\omega - \omega_0}{(\omega - \omega_0)_r} \right]^{3/2} (Y/Y_r)^{-2/3} (D/D_r)^{-1/2} \quad (4)$$

der

$$\omega = \rho g Y S v$$

$$\omega_0 = 5.75 [(\gamma_s - \gamma) \rho \cdot 0.04]^{3/2} (g/\rho)^{1/2} D^{3/2} \log(12Y/D)$$

$$i_{br} = 0.01$$

$$(\omega - \omega_0)_r = 0.5$$

$$Y_r = 0.1$$

$$D_r = 0.0011$$

Symbolliste

D	karakteristisk kornstørrelse	ρ	tettheten til væske
D_i	kornstørrelsen (med mer)	ρ_s	tettheten til sedimentet
D_r	referanseverdi av D (Bagnold)	τ_*	dimensjonsløs skjærspenning
i_b	bunntransport i kilo $s^{-1} m^{-1}$	τ_{*c}	dim.løs kritisk skjærsp.
i_{br}	referanse verdi til i_b (Bagnold)	ω	spesifikk energi
K_s/K_r	korreksjonsfaktor for ruheten til bunnformer	ω_0	kritisk spes. energi
P_i	vektandelen til hver kornstørrelse		
Q	vannføring i $m^3 s^{-1}$		
S	gradienten i $m m^{-1}$		
Y	dybde		
Y_r	referanse dybde (Bagnold)		
g	gravitasjonens akselerasjon		
v	hastighet		
γ	spesifikk gravitet til væske		
γ_s	spesifikk gravitet til sediment		

En av de første bunntransportlikninger som ble utviklet var DuBoys likning (1879 - referert i Chang 1988 og ASCE, 1975) og er basert på skjærspenningsbetrakninger. Straub (1935 – referert i ASCE, 1975) utviklet likningen videre og bestemte koeffisienter på basis av data fra Missouri. Et problem som Church & Gomez (1989) nevner med bruk av DuBoys likning i gruselver er at det er vanskelig å bestemme en kritisk skjærspenning for initiering av transport og at den 'karakteristiske sedimentkoeffisienten' bare er gyldig i et begrenset kornstørrelsesintervall. Mange av de vanligste likninger som egner seg for bruk i gruselver ble utviklet parallelt med utviklingen av målemetodikk i mellomeuropa i begynnelsen av tredve-årene. Meyer-Peter et al. (1934) og Schoklitsch (1934) ble utviklet her. Disse er relativt enkle likninger som baserer seg på en sammenheng mellom enten skjærspenning eller vannføring, størrelsen til sedimentet gitt direkte eller ved en eller annen representativ kornstørrelse (D_{50} hos Meyer-Peter et al., 1934) og bunntransporten. Schoklitsch utviklet 1934-likningen videre og presenterte i 1962 en versjon hvor en beregner den kritiske vannføring for initiering av transport separat. Likningen er utviklet for elver med grovt materiale. Denne får best resultat i Bathurst et al. (1987) sin test av forskjellige bunntransportlikninger. En grunn til at den egner seg i bratte elver er at den ikke krever dybde som en inngangsparameter. Bogen et al. (1997) har benyttet den i Suldalslågen i Norge for å sammenlikne bunntransporten under forskjellige reguleringer av vassdraget.

Meyer-Peter & Muller (1948) utviklet likningen til Meyer-Peter et al. (1934) videre som en funksjon av effektiv skjærspenning og kritisk skjærspenning (likning 3). Den inkluderer to reduserende faktorer. Dette tar hensyn til at det bare er en mindre andel av vannføringen som virker på bunnen og formmotstanden som reduserer skjærspenningen tilgjengelig for bunntransport. Den har vært populær blant geomorfologer og er relativt enkel i bruk. Den ble utviklet med data fra forsøksrenner og med et spenn av kornstørrelser fra 0.40-28.65 mm. Ifølge Gomez & Church (1989) har Meyer-Peter & Muller (1948) likningen problemer med å estimere en kritisk grense for transport, overestimerer transporten og har stor spredning i resultatene. Schoklitsch (1934) likningen overestimerer også transporten men på langt nær så mye som Meyer-Peter & Muller (1948) og den har mye mindre spredning av resultatene. Et problem som nevnes med Schoklitsch (1934) likningen er at den gir negative transport for grove partikler. Dette fordi den kritiske vannføringen for en gitt kornstørrelse ofte er større enn den observerte vannføringen for grovt materiale. Formelen kompenserer med høye transportrater for sandfraksjonen.

Einstein (1950) utviklet en bunntransportmodell basert på sannsynligheten av bevegelsen til partiklene ved gitte hydrauliske forhold. Utviklingen av likningen er basert på fluid mekanikk og statistisk teori og er et av de mest komplekse prosedyrene som er utviklet for beregning av bunntransport (Gomez & Church, 1989). En god beskrivelse av likningen blir gitt i Chang (1988) og bruken er beskrevet i ASCE, *Sedimentation Engineering* (1975). Sannsynligheten for bevegelsen til en partikkel er gitt som funksjon av to dimensjonsløse parametre (ψ_{*i} - strøm intensiteten og ϕ_{*i} - bunntransport intensiteten for hver fraksjon i sedimentet). Likningen tar hensyn til forhold som skjerming av partiklene (funksjon av kornstørrelse) og hydrodynamisk løft. Likningen er basert på empiriske data og flere av parameterne som inngår i likningen bestemmes grafisk fra kurver. For graderte sedimenter (dvs. et sediment som består av flere fraksjoner) beregnes transporten for hver fraksjon og summeres. Den originale likningen ble utviklet med kornstørrelser opptil 28.65 mm men den videre utvikling som førte frem til den endelige versjonen ble utført i sand. Dette gir, ifølge Church & Gomez (1989), flere problemer når den brukes i gruselver. De anbefaler imidlertid denne likningen der lokale transportestimer er ønsket og der en har lokal hydraulisk informasjon tilgjengelig (f.eks ved lokale erosjonsproblemer). Likningen ble programmert for bruk i tidlige versjoner av HEC-6 men er ikke med i dagens versjoner. Einstein sine konsepter om partikkelbevegelse og utveksling av partikler i dekklaget er imidlertid innbakt i algoritmene som beskriver disse prosessene i HEC-6 (HEC-6 brukermanual, 1993).

Bagnold's (1966, 1980) likning beskriver en sammenheng mellom sedimenttransport og energibruk i løpet. Den er basert på fysiske prinsipper men eksponentene er blitt kvantifisert empirisk. Den har blitt brukt med hell i mange typer vassdrag inkludert bratte vassdrag med grovt materiale (Bathurst et al., 1987). Gomez & Church (1989) anbefaler bruk av likningen eller en liknende 'stream power' tilnærming der hvor en har begrenset hydraulisk informasjon. Denne likningen har minst avvik fra observert transport i deres test. Bagnolds prosedyre har vært mye brukt for å beregne bunntransporten i vassdrag med grovt materiale spesielt de siste årene (Reid & Frostick, 1986; Hassan et al., 1992; Gilvear & Bradley, 1997).

Ackers & White (1973) utviklet en likning for totaltransport av sedimenter (både bunntransport og suspendert sediment) basert på fysiske prinsipper og med en bunntransport del som gjelder for uniforme sedimenter. De har evaluert fire parametre som inngår i likningen mot eksperimentel data. White & Day (1982) utviklet likningen videre for å gjelde for en blanding av fraksjoner. Begge likningene overestimerer bunntransporten i testen til

Gomez & Church (1989). I testen til Bathurst et al. (1987) viser resultatene fra Ackers & White likningen stor spredning.

Parker et al. (1982) utviklet sin likning på basis av feltdata og de beskriver effekten av et dekklag på bunntransporten i en naturlig elv. De har utviklet en empirisk relasjon for total bunntransport hvor den er funksjon av skjærspenning og D_{50} til sedimentene under dekklaget. Ligningen beskriver 'equal mobility' (dvs. lik mobilitet for alle kornstørrelser) etter at en kritisk vannføring for bevegelse av dekklaget er overskredet. Den beregner ikke en kritisk vannføring for initiering av transport. I følge Parker et al. (1982) egner denne likningen seg for gruselver med moderate til høye gradienter og som ikke er dominert av sandtransport gjennom løpet. Likningen er den eneste som underestimerer bunntransporten i Gomez og Church (1989) sin test. Chang (1988) gir en god beskrivelse av likningen.

Smart & Jæggi (1983) og Smart (1984) har ekstrapolert og utvidet Meyer-Peter & Muller (1948) likningen for høye gradienter og løp med grovt materiale. Dette har de gjort på basis av forsøk i renne. De fant at den opprinnelige Meyer-Peter & Muller (1948) likningen konsekvent underestimerte bunntransporten i sine forsøk i bratte renner. Dette fordi likningen bruker en ruhetsfaktor som ikke gjelder ved høye gradienter. Ved å forenkle likningen får de bedre resultater. De har foretatt en videreutvikling av likningen for å få en best mulig tilpasning med de originale data den ble basert på og egne data. Transporten som beregnes med den modifiserte likningen er først og fremst relatert til vannføringen, gradient og en verdi J_{cr} som blir kalt kritisk gradient. Med unntak av tillegget J_{cr} likner denne på Bagnolds prosedyre med energibetrakninger. Bathurst et al. (1987) fant at likningen i stor grad overestimerer bunntransporten.

4.2. Sammensatte modeller

Med sammensatte modeller menes modeller som tar for seg hele sedimenttransportprosessen inkludert modelleringen av vannets transport gjennom løpet, initieringen av transport og prosesser i dekklaget, selve transporten av materiale og sedimentasjon med påfølgende endringer i løpets geometri og sedimentologiske sammensetning. I det følgende drøftes to sammensatte modeller, HEC-6 og MIKE-11. Pickup (1988) gir en god oversikt over hydrologi og sediment modeller og sammensatte modeller. Han gir også en beskrivelse av HEC-6 modellen og Borah et al. (1982) modellen. Pickup (1980) har brukt HEC-6 modellen

for å simulere effekten av en demning på sedimenttransport og erosjon i Ny Guinea. For en mer detaljert beskrivelse av HEC-6 kan man også se Thomas (1982) og brukermanualen. For en detaljert beskrivelse av MIKE-11, se brukermanualen.

HEC-6 modellen ble utviklet av W.A. Thomas ved U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre. Første versjon kom i 1976. Det er en en-dimensjonal numerisk modell som simulerer endringer i løpsprofiler som et resultat av erosjon og/eller pålagring. Modellen består av en modul (HEC-2), som beregner hydrauliske parametere i elveløpet og en sedimenttransportmodul. Som inngangsdata kreves tverrprofiler, vannføringsdata og sedimenttransportkurver i øverste profil for hver kornfraksjon. Videre trenger man kornfordelingskurver for bunnmaterialet og dybde og bredde på det aktive laget på bunnen. Alternativt kan sediment input til strekningen beregnes ved hjelp av bunntransportformler. Sedimenttransport beregningene foretas for hver fraksjon og modellen kan også simulere hydraulisk sortering og dekklagsdannelse, og endringer i tverrprofiler. Transporten kan beregnes for kornstørrelser opptil 2048 mm. Sedimenttransport i HEC-6 modellen blir beregnet ved hjelp av kontinuitetslikningen og som funksjon av forskjellige parametre.

Hvis transportkapasiteten beregnes til å være større enn input av sedimenter vil tilgjengelig sediment bli fjernet fra bunnen slik at kontinuitet opprettholdes. Omvendt så vil materiale sedimentere dersom transportkapasiteten er mindre enn innstrømningen av sedimenter. Bunnen blir delt opp i tre forskjellige soner i HEC-6; dekklaget i overflaten som er en kornstørrelse tykk, det aktive laget og det inaktive laget. Tykkelsen på det aktive laget beregnes under modelleringen og er den delen av bunnlaget mellom overflaten og en hypotetisk dybde. Det foregår ikke sedimenttransport under denne hypotetiske dybde for de gitte sedimentologiske- og strømningsforhold. Laget under det aktive laget kalles det inaktive laget. Utveksling av sedimenter med det inaktive laget foregår også under transportepisoden. Det er programmert og beskrevet to forskjellige metoder for beregning av den hydrauliske sorteringen av bunnmaterialet i modellen. Bredden og dybde av den mobile bunn defineres av brukeren og ingen videre lateral eller vertikal erosjon eller utveksling av partikler foregår her. Det kan imidlertid forekomme pålagring utenfor den mobile bunn. Stabiliteten til dekklaget under gitte forhold beregnes ved hjelp av Gesslers arbeid (1970) på sannsynligheten av et en partikkel vil forbli immobil som funksjon av skjærspenningen til strømningen og en teoretisk

skjærspenning. Gessler angir en verdi for et stabilt dekklag som blir brukt i HEC-6 til å indikere når dekklaget brytes opp og hele det aktive laget kommer i bevegelse.

Sedimenttransportberegningene begynner fra øverste profil. Transportberegningene blir utført fra oppstrøms og nedover for hver seksjon; dekklagsstabilitet blir testet; likevekts dybden (dvs. minimums dybden som er nødvendig for at en gitt kornstørrelse i dekklaget forblir immobil – i praksis den minste som er stabil i dekklaget) og bunnens høyde i likevekt og tykkelsen til det aktive laget blir beregnet; sediment utveksles mellom de aktive og inaktive lag og den effektive størrelse til bunnmaterialet blir beregnet. Transportpotensialet til hver fraksjon i bunnmaterialet kan så beregnes ved hjelp av en transportlikning. Det er programmert 12 likninger for bruk i sand og gruselver i modellen. Transporten beregnes ved å løse kontinuitetslikningen i eksplisitt form. Modellen justerer løpets geometri for hvert tidsskritt og starter beregningen på nytt for neste tidsskritt.

Pickup (1988) nevner flere problemer med modellen. En viktig innvending er at modellen krever store mengder data og det er bortimot umulig å samle inn alle de data som kreves for en fullstendig kjøring av modellen. Dette gjelder spesielt større elver med grovt materiale. Det er svært kostnadskrevende og vanskelig å etablere sedimentføringskurver for alle kornstørrelser ved en rekke forskjellige vannføringer. I tillegg kreves kornfordelinger av både overflate materialet og kornfordelingen til de underliggende sedimentene. Dersom det er stor variasjon nedover løpet må det tas prøver på flere steder. Tverrprofiler av løpet er også kostnadskrevende data å samle inn. I tillegg så er beregningsmetoden ustabil over lange strekninger eller tidsskritt og modellens oppførsel er avhengig av lengden på tidsskrittene og strekningen som modelleres. Modellen virker best på studier av langtidseffekter, men egner seg dårlig for å studere virkninger over kortere perioder. Modellen kan ikke beregne transporten gjennom forgreininger av løpet.

MIKE-11 er en modell utviklet ved det Danske Hydrauliske Institutt (DHI) for å simulere vannføring, sedimenttransport og vannkvalitet i estuarier, elveløp og irrigasjonssystemer. Modellen består av en rekke moduler. Kjernen i modellen er den hydrodynamiske modulen (HD-modulen) som kan simulere ikke-stasjonær strømming i et nettverk av åpne kanaler. Resultatene fra en HD simulering (vannføringer og vannstander) brukes som input i de andre modulene. Man kan velge mellom tre forskjellige prosedyrer for å beregne vannstanden og vannhastighet i strekningen; to er basert på løsninger av 'Saint Venant' likningene (se f.eks

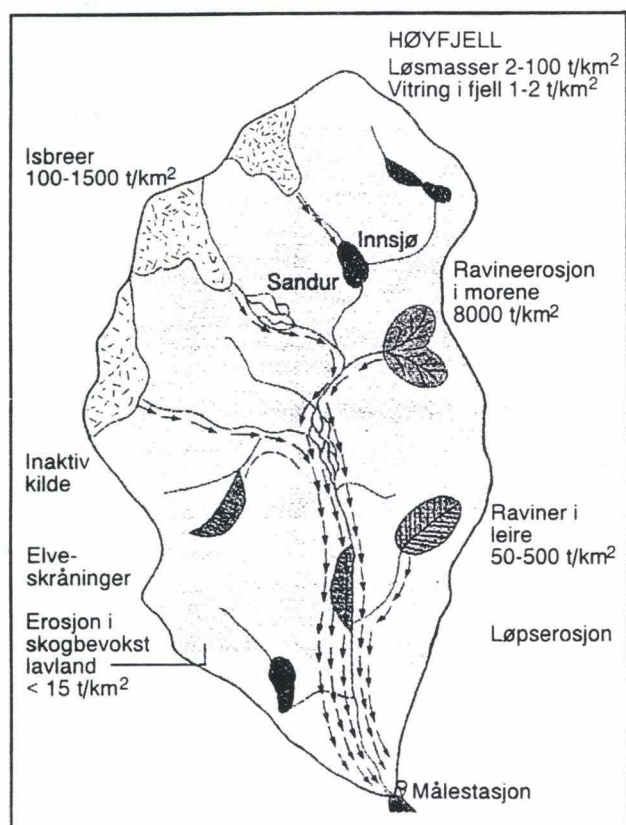
Dingman, 1984) og en er basert på beregning av en kinematisk bølge. Den siste metoden er best egnet i bratte vassdrag uten oppstuvningseffekter. Bunntransportberegningene foretas i NST-modulen ('non-cohesive sediment transport'). Denne modulen kan kjøres på to måter; eksplisitt og morfologisk. I den eksplisitte formen blir det ikke gitt noen tilbakemelding fra transportmodelleringen til HD-modulen. Resultatene fra en slik simulering blir gitt i form av transportrater og volumer av erosjon og pålagring. Denne måte å beregne transporten på krever mindre maskintid enn den morfologiske. I den morfologiske simuleringen kjøres transportberegningen parallelt med HD-modulens beregninger. Kontinuitetslikningen for sedimenttransporten løses, og de geometriske data i HD-modulen oppdateres. Resultatene fra denne måten å kjøre modellen på er transportrater, endringer i bunnens høyde, bunnens motstand og høyde på bunnformer. Det er fem forskjellige transportlikninger som benyttes i MIKE-11. De to modellene som egner seg best for gruselver er Ackers & White (1973) og Smart & Jæggi (1983). Alle modellene kan kjøres ved å bruke en enkel representativ kornstørrelse, eller ved å bruke flere kornstørrelser som representerer forskjellige fraksjoner i en gradert sedimentblanding. Likningen til Ackers og White ble utviklet for kornstørrelser som fra 0.04-4.94 mm. For Smart og Jæggi gjelder følgende intervall $d_{30}/d_{90} < 8.5$. I et forsøk på å utvide området som likningen gjelder for, har MIKE-11 implementert likningen i modellen slik at det er mulig for brukeren å redigere koeffisienter og eksponenter i likningen. Det blir imidlertid ikke anbefalt noen verdier eller gitt noen forklaring på koeffisientene og eksponentene og hvordan de virker i manualen.

Andre sammensatte modeller som modellerer hele transportprosessen er modellen utviklet av Borah et al. (1982) og er beskrevet i Pickup (1988). Denne blir brukt i modellen SELSIM av Dalviken (1992). Pickup (1988) har også utviklet en modell som beskriver sedimenttransport i et anastomerende løp.

5. Virkninger av inngrep

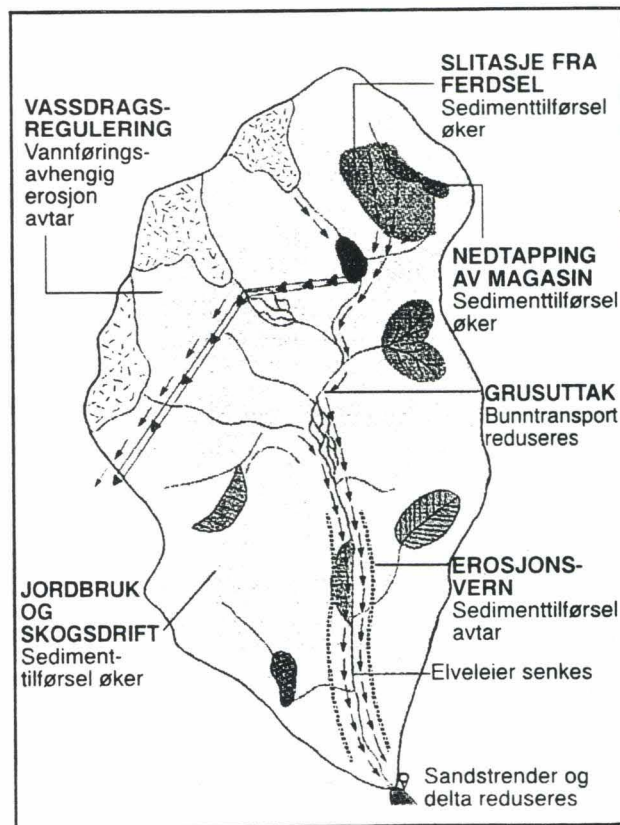
Forskjellige inngrep i vassdrag slik som dambygging og regulering, vassdragstekniske tiltak og grusuttak vil ofte påvirke bunntransporten på en eller annen måte. Både tilførselen av sediment og løpets hydrauliske kapasitet kan endres ved forskjellige inngrep. Dette kapittelet tar for seg virkningene av tre typer inngrep som er vanlige i norske vassdrag; dambygging for kraftformål, erosjons- og flomsikringstiltak og grusuttak. Figur 9 viser hvordan inngrep i vassdrag kan virke inn på erosjons- og transportprosessene og materialstrømmen i norske vassdrag.

EROSJONSPROSESSER I NORSKE VASSDRAG



a)

INNGREP I VASSDRAG



b)

Figur 9. a) Idealisert vassdragsmodell som viser materialstrømmen fra sedimentkildene i vassdraget. b) Inngrep i vassdrag som fører til endringer i materialstrømmen. Menneskelig virksomhet kan også føre til en økning i materialtransporten (fra Bogen, 1986; 1993).

5.1. Kraftutbygging

De viktigste virkningene av dambygging for bunntransportprosesser er endringer i vannføringen og endringer i tilførselen av sediment til løpet.

Endringen i vannføringen kan være daglig ved effektkjøring av kraftverket eller over sesonger i kraftverk som produserer for å dekke en sesongmessig etterspørsel. De mest vanlige konsekvenser er redusert middelvannføring, reduserte flomvannføringer og flomfrekvenser, redusert variabilitet og unaturlige pulser (Petts, 1984a). En vanlig effekt er at de midlere flomvannføringer reduseres mens store flommer har samme frekvens som før utbygging (Knighton, 1988; Maheshwari et al., 1995), men det motsatte er også observert, dvs. at antall flommer av midlere størrelse er økt men antall store flommer er redusert (Ning, 1985). Norske kraftverk er først og fremst bygget for å lagre overskuddet av vann om sommeren og dekke behovet for kraft i vinterhalvåret. Dette fører til redusert vannføring i sommerhalvåret og økt vannføring om vinteren. Avansert tunnelteknologi har også ført til at vannet kan fraktes over lange strekninger fra dammen til kraftverket og lange strekninger i vassdragene har derfor fått kraftig redusert vannføring hele året.

De fleste studier av virkninger av kraftutbygging på bunntransporten er indirekte studier i og med at man har studert endringer av løpet som er en følge av endret bunntransport men ikke målt bunntransporten direkte. Man kan skille mellom to type endringer som følge av endret bunntransport etter regulering: senking av løpet (erosjon) og heving av løpet (pålagring). Petts (1984 a) gir en god oversikt over de forskjellige virkninger av kraftutbygging.

Senking av løpet skjer der hvor strømmen har økt sin transportkapasitet enten ved at tilførselen av sedimenter blir redusert eller at erosjonbasis er blitt senket (Galay, 1983). Det kan også forekomme der hvor transportkapasiteten har økt som følge av økt vannføring ved en overføring (Church, 1995). Senking av løpet nedstrøms dammer som en følge av redusert tilførsel av sediment har vært rapportert i en rekke studier i mange deler av verden (Kashef, 1981; Biedenharn, 1983; Galay, 1983; Williams & Wolman, 1984; Ning, 1985; Andrews, 1986; Carling, 1988; Kondolf & Swanson, 1993; Moattassen & Abdelbary, 1993; Thoms & Walker, 1993; Marston et al., 1995; Schmidt et al., 1995; Habersack, 1996; Wiess, 1996). Raten, dybden og utstrekningen av senkingen kan være svært variabel og er avhengig av mange faktorer slik som størrelsen på bunnsedimentene, den vertikale stratigrafien i løpet,

tilførsel av sedimenter fra sidene og sideløp og variasjonene i vannføringen nedstrøms dammen (Galay, 1983). I en studie av 21 elver i USA påviste Williams & Wolman (1984) senking av løpet nedstrøms dammer som varierte fra noen få desimeter og ned til 7,5 meter. Lengden på strekningen som blir påvirket kan variere fra noen kilometer (Williams & Wolman, 1984) og opptil mange hundre kilometer (Kashef, 1981; Ning, 1985). Senkingen av løpet kan reduseres eller hindres enten ved at bunnsedimentene blir grovere på grunn av utvasking (Ning, 1985) eller ved at det finnes underliggende lag med grovere sediment (Andrews, 1986; Knighton, 1988; Schumm & Galay, 1994; Xu, 1996). Utviklingen av vegetasjon langs løpet som følge av redusert vannføring vil også påvirke løpets stabilitet (Gurnell, 1995) og kan hindre lateral erosjon og forsterke senkingen (Marston et al. 1995). Senking av sideløp som følge av en senking av hovedløpet er observert i Canada (Kellerhals, 1982) og USA (Germanoski & Ritter, 1988). Senking av hovedløpet etter regulering er ikke beskrevet i norske vassdrag. De fleste norske elveløp har grovt bunnmateriale eller lag med grovt materiale og er ikke like utsatt for erosjon som løp i sand og finere materiale. Plasseringen av dammene øverst i vassdragssystemet og ofte i tilknytning til naturlige sedimentasjonsbassenger virker i tillegg slik at man ikke får en stor reduksjon i sedimenttilførselen til løpet nedstrøms dammen. Erosjon som følge av redusert sedimenttilførsel kan imidlertid være av betydning i andre miljø enn i løpet umiddelbart nedstrøms reguleringsdammen f.eks. på deltaer og strender. Høye erosjonsrater og stor senkning av bekkeløp til reguleringsmagasiner har blitt observert på grunn av senkning av vannstanden under naturlig nivå (Mosevoll & Torsethaugen, 1976; Tesaker & Dahl, 1992).

Pålagring eller hevning av løpet får en der hvor tilførselen av sedimenter overstiger vannets transportkapasitet. En vanlig effekt av regulering er reduserte flomvannføringer og en reduksjon i frekvensen av store flommer. Dette reduserer vannets transportkapasitet spesielt for det groveste bunnmaterialet. Pålagring og reduksjon av løpets kapasitet har blitt observert i regulerede vassdrag i en rekke land (Gregory & Park, 1974; Petts, 1977, 1979; Kellerhals, 1982; Gurnell, 1983; Petts, 1984b; Carling, 1988; Knighton, 1988; Everitt, 1993; Church, 1995). Dette er også observert i Norge (Svantesvold, 1980; Fergus, 1993, 1997; Grundt, 1996). Sedimentkilder kan være uregulerte sideløp (Everitt, 1993; Church, 1995; Fergus, 1993) og pålagring og utvikling av banker umiddelbart nedstrøms samløpet av hovedløp og sideløp i regulerede vassdrag har blitt observert (Howard & Dolan, 1981; Petts & Thoms, 1987; Church, 1995; Sear, 1995). Andre kilder kan være sediment erodert fra løpet umiddelbart nedstrøms dammen (Andrews, 1986) og sediment erodert fra sideløp som følge av senket erosjonsbasis

(Beidenharn, 1983). Pålagring som følge av hevet erosjonsbasis oppstrøms for en reguleringsdam er blitt observert i Kina av Xu (1990). Redusert vannføring og flomfrekvens fører til et mere stabilt bunnssubstrat og vegetasjonsinnvandring på banker i løpet er ofte observert i forbindelse med regulering (Svantesvold, 1980; Fremstad, 1986; Gurnell et al., 1990; Erlandsen, 1991; Oddland, 1993; Everitt, 1993; Fergus, 1993; Carter Johnson, 1997). Vegetasjon bidrar til å stabilisere bunnsedimentene ytterligere og fange finmateriale (Petts, 1984a). I tillegg minsker vegetasjon løpets hydrauliske effektivitet slik at nivået på høye vannføringer kan bli høyere enn før vegetasjonsinnvandring (Fergus, 1993). Pålagring i løpet vil føre til en økning i gradient slik at de tilførte sedimentene kan transporteres gjennom løpet med de reduserte vannføringer og løpet vil teoretisk oppnå et likevekt mellom sedimenttilførsel og erosjon etter en viss tid. Et slikt likevekt ble muligens oppnådd i Fortunvassdraget (Fergus, 1997). Det ble observert at gradienten hadde økt mellom 1973 og 1989 og at den årlige raten av pålagring hadde avtatt mellom 1989 og 1995 i forhold til perioden fra 1973.

5.2. Vassdragstekniske inngrep

Vassdragstekniske inngrep er direkte inngrep i elvas løp som kan ha en eller flere formål. De mest vanlige vassdragstekniske inngrep i norske vassdrag er flom- og erosjonssikringstiltak. En oversikt over flom- og erosjonssikringstiltak er gitt i NOU 1996:16 og Vassdragshåndboka (Sæterbø et al. 1998). Ved erosjonssikring vil man hindre elva å grave sideveis innover land. Man kan sikre skråningen mot elva ved å plastre med sprengstein eller ved hjelp av buner som leder strømmen ut fra elvebredden. Erosjonssikring av bunnen utføres der hvor en ønsker å stabilisere bunnen og hindre senking. Dette kan gjøres ved å plastre bunnen og legge inn terskler og steinbånd. Flomsikringstiltak skal hindre oversvømmelse av et bestemt område og kan oppnås ved å senke elveløpet eller en innsjø, retting av løpet, bygging av flomvoller og bygging av masseavlagingsbasseng.

Brooks (1985, 1988) gir en oversikt over forskjellige vassdragstekniske inngrep og internasjonale studier av de fysiske og biologiske virkninger av slike inngrep. Virkningene av slike inngrep varierer i stor grad fra inngrep til inngrep, og er avhengig av konstruksjonen og utforming på tiltaket og lokale forhold slik som sedimenttilførsel og bunnmateriale på stedet. Bygging av flomverk og utretting øker løpets gradient og hindrer vannet i å spre seg ut på elvesletta. Dette øker vannets hastighet og dets transportevne for tilført sediment og dets

erosjonskraft på bunnmaterialet. Dette kan føre til senkning av løpet og ustabile banker både i det kanaliserte løpet og nedstrøms. Erosjonssikringstiltak kan medføre redusert sedimenttilførsel til områdene nedstrøms og kompenserende erosjon her. Brooks (1987) undersøkte løpet nedstrøms 46 kanaliseringstiltak i britiske vassdrag og fant en økning i løpets kapasitet i 14 tilfeller. Kanaliseringen økte vannets transportevne ved at strømmen ble mer konsentrert ved høye vannføringer enn tidligere. Der hvor det ikke skjedde noen endring fant Brooks at økningen i transportevne ikke var tilstrekkelig til å bevege bunnsedimentene. Raba elva i Polen har senket seg opptil 3 meter etter kanalisering og utretting, finstoff er vasket ut og bunnmaterialet har blitt grovere med et tett imbrikert dekklag (Wyzyga, 1993). Senkingen av Raba elva har ført til at flombølgen passerer hurtigere enn tidligere og med høyere nivå. En annen virkning av senkning av løpet er erosjon og senkning av sideløp (Brooks, 1988). Områdene nedstrøms kan også bli utsatt for pålagring dersom de får tilført et overskudd av sedimenter som et resultat av økt erosjon oppstrøms og Simon (1989) observerte pålagring med en rate på 0.12 m pr. år nedstrøms kanaliserte strekninger i USA. Han observerte også sekundær pålagring oppstrøms kanaliserte områder som en følge av erosjon og påfølgende reduksjon av gradienten. I Drau elva i Østerrike har deler av løpet senket seg opptil 1.5 m etter kanalisering i 30 årene (Habersack, 1995). Leeks et al. (1988) beskriver kraftig lateral instabilitet som en følge av senking, rensking og bygging av flomvoller i et mindre vassdrag i Wales. I Norge har Fletcher (1987) studert de geomorfologiske konsekvensene av et flomsikringstiltak i Rena i en kort periode etter byggingen av tiltaket. Ved dette tiltaket ble løpet rettet og forkortet fra 15.1 km til 11 km, bankene ble forsterket og forhøyet og bunnen ble erosjonssikret ved terskler. Det ble observert kraftig erosjon i de øvre deler av løpet umiddelbart etter konstruksjon og undergraving av skråningsfoten på flomvollen. Deretter ble det observert pålagring av grovt materiale og utvikling av midtbanker i løpet. I et studie av nedre del av Mississippi i USA fant Winkley (1982) at kanaliseringsarbeidene (utretting og bygging av flomverk) i vassdraget krevde svært mye vedlikehold på grunn av senkning i den øvre del av løpet og pålagring i den nedre og stor sedimenttransport. Han mener at dette kunne vært unngått ved å følge de naturlige tendensene en stabil kanal har til å balansere transport, lagring og erosjon og at dette foregår mest effektivt i et asymmetrisk, meanderende løp. Habersack (1995) og Gilvear & Bradley (1997) beskriver endringer i en kort periode etter restaurering av kanaliserte løp. De understreker behovet for å planlegge 'dynamisk stabile kanaler' som tar hensyn til sedimenttransportprosesser i løpet. De tar også til orde for at hovedtrekkene i slike kunstige løp blir utført maskinelt men at det tilrettelegges for en naturlig justering av mindre løpsformer etter at tiltaket er bygget. Downs & Brookes (1994) beskriver

et system for en geomorfolgisk vurdering av vassdragstekniske inngrep både før og etter inngrepet.

5.3. Grusuttak

Løsmassene i norske vassdrag blir utnyttet til en rekke bygge- og anleggsformål i både privat og offentlig regi. Størrelsen og varigheten på uttakene varierer fra små uttak til lokale formål i en begrenset tidsperiode, til store uttak for industrielle formål som pågår over mange år. Uttak av løsmasser kan være gunstig der hvor stor masseavlagring medfører farer og ulemper. Uttak av løsmasser fra elveløpet kan også føre til uønskede virkninger som endrede strømforhold som kan føre til økt erosjon og senking av løpet. Erosjon kan også bli framskyndet ved at det grovere dekklaget som beskytter finere underliggende sedimenter blir ødelagt. Områdene nedstrøms uttak kan bli tilført mindre sedimenter og dette kan også føre til en erosjon her.

Flere internasjonale studier indikerer at erosjonsproblemene ved grusuttak kan være betydelige. I en guide om fluvial geomorfologi og grusuttak for planleggere i California gir Collins & Dunne (1990) en god oversikt over internasjonale studier og en sammenstilling av virkninger av grusuttak i flere vassdrag i California. De fant at uttak som overskred den naturlige transporten førte til erosjon både oppstrøms og nedstrøms uttaksområdet og at dette igjen kunne føre til at broer og andre konstruksjoner langs vassdraget ble undergravet. På den andre side kunne grusuttak bidra til å hindre eller forsinke pålagring i løp med naturlig stor transport og vedlikeholde flomkapasitet. De nevner også flere virkninger slik som undergraving av banker og senking av grunnvannstand som en følge av en senkning av løpet. I Stony Creek i California fant Kondolf & Swanson (1993) at store årlige uttak av grus har forårsaket opptil 5 m senking av løpet og undergraving av brofundamenter. Dette medførte reparasjoner for US \$1.4 mill. I New Zealand er det observert stabilisering av løpet nedstrøms et grusuttaksområde og senking i selve grusuttaksområdet (Page & Heerdegen, 1985). Petit et al. (1996) beskriver virkningene av store uttak av grus i Rhonen i Frankrike. Også her har uttakene resultert i en dramatisk senkning av løpet og ødeleggelse av dekklaget. Dette medførte en senkning av grunnvannstanden som igjen medførte store negative økologiske konsekvenser og vannforsyningsproblemer. Sear & Archer (1995) beskriver virkningene av 50 år med store uttak i et vassdrag i nord-England. Uttakene har vært flere hundre ganger større enn beregnet tilførsel og det er observert en vertikal senkning på opptil 9 meter. I Norge har grusuttakene i Gaula blitt studert av Dahl og Godtland (1995). Grusuttak

pågikk fram til 1988 da det ble innført stopp i uttakene i en femårsperiode. Flybilder av Gaulosen (Gaulas delta i sjøen) fra 1977, 1988 og 1994 ble brukt til å konstruere kotekart over området. Kotekartene var grunnlag for å beregne nivåendringer på deltaet. Beregningene viste at det var erodert $130\,000\text{ m}^3$ fra området som tilsvarer en senkning på 0.13 m. Tverrprofiler av elveløpet ble målt opp i 1991 og 1994 for å studere konsekvensene av uttakstoppen. Det ble konstatert en pålagring i løpet på ca. 2000 m^3 som tilsvarer en heving på ca. 0.10 m.

REFERANSER

Ackers, P. & White, W. R. 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Proc. ASCE. J. Hydraul. Div.*, **99** (HY11), 2041-2060

Andrews, E.D. 1986. Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado and Utah. *Geological Society of America Bulletin*, **97**, 1012-1023.

Andrews, E. D. & Parker, G. 1987. Formation of a coarse surface layer as the the response to gravel mobility, p 269-325 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.

Arratano, M. & Moia, F. 1997. Monitoring the propogation of a debris flow along a mountain torrent. (in press).

ASCE, 1971. Sediment transportation mechanics: Sediment discharge formulas, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **97**(HY4), 523-567.

ASCE, 1975. Sedimentation Engineering, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*. No. 54, V. Vanoni (ed), ASCE, New York, 745 p.

Ashmore, P. 1991. Channel morphology and bed-load pulses in braided gravel-bed streams. *Geografiska Annaler*, **73 A**, 37-52.

Ashworth, P. J. & Ferguson, R. I. 1989. Size-selective entrainment of bedload in gravel-bed streams. *Water Resources Research*, **25**, 627-634.

Bagnold, R. A. 1966. An approach to the sediment transport by problem from general physics, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 422-1.

Bagnold, R. A. 1980. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 372, 453-473.

Banzinger, R. & Burch, H. 1990. Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent, p 223-230 in: *Hydrology in Mountainous Regions I*, Land, H. & Musy, A. (eds), IAHS Publ. 193,

Banzinger, R. & Burch, H. 1991. Geshiebetransport in Wildbachen. *Schwiezer Ingenieur und Architekt, Heft 24*.

Bathurst, J. C. Graf, W. H. & Cao, H. H. 1987. Bed load discharge equations for steep mountain rivers, p 453-491 in: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.

Bathurst, J. C., Hubbard, L., Leeks, G. J. L., Newson, M. D. & Thorne, C. R. 1990. Sediment yield in the aftermath of a dambreak flood in a mountain stream, p 287-294. *Hydrology in mountainous regions II, Artificial Reservoirs; Water and Slopes*. IAHS Publ. 194.

- Beidenharn, D. S. 1983. Channel response on the Little Tallahatchie River downstream of Sardis Dam, p 500-509 in: *River Meandering*, C. M. Elliot (ed), ASCE Special Publication.
- Bogen, J. 1983. Morphology and sedimentology of deltas in fjord and fjord valley lakes. *Sedimentary Geology*, 36, 245-267.
- Bogen, J. 1986. Erosjonsprosesser og sedimenttransport i norske vassdrag. Utredning av forvaltningsansvar, faglig status og forskningsbehov. Norsk Hydrologisk Komite, rapp. Nr. 20/ 86 109 s.
- Bogen, J. 1989. Glacial sediment production and developement of hydro-electric power in glacierized areas. *Annals of Glaciology*, 13, 6-11.
- Bogen, J. & Kennet, M. 1991. Bunntransportens vandringshastighet i vassdrag. *FoU programmet "Vassdragsdrift" – Statusrapport 1990*. G. Berg & P. Faugli (red). NVE Publikasjon nr. 15.
- Bogen, J. 1993. Fluviale prosesser, s 96-124 i: *Inngrep i vassdrag; konsekvenser og tiltak – en kunnskapsoppsummering*, P. E. Faugli, A. H. Erlandsen & O. Eikenæs (red). NVE Publikasjon Nr. 13.
- Bogen, J., Bønsnes, T. E. & Benjaminsen, H. 1997. Suldalslågen, sedimentkilder og sedimenttransport. *Lakseforsterkningsprosjektet i Suldalslågen fase II*. Rapp. nr. 35. Statkraft Engineering, 96 s.
- Borah, D. K., Alonso, C. V. & Prasad, S. N. 1982. Routing graded sediments in streams: formulations. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 108, 1486-1517.
- Brayshaw, A. C. 1984. Characteristics and origin of cluster bedforms in coarse-grained alluvial channels. *Mem. Can. Soc. Petro. Geol.*, 10, 77-85.
- Brittain, J. E. & Saltveit, S. J. 1997. A study of climate change effects on alpine and arctic running waters. *Arctic and Alpine Stream Ecosystem Research (AASER)*. Scientific Report to the EU Commision for the period 1/3 1996 to 28/2 1997.
- Brookes, A. 1985. River channelization: traditional engineering methods, physical consequences and alternative practices. *Progress in Physical Geography*, 9, 44-73.
- Brooks, A. 1987. River channel adjustments downstream from channelisation works in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 125-134.
- Brooks, A. 1988. *Channelized Rivers, Perspectives for Environmental Management*. Wiley, Chichester, 326 p.
- Bunte, K. 1990. Experiences and results from using a big frame bed load sampler for coarse material bed load, p 223-230 in: *Hydrology in Mountainous Regions, I*. Land, H. & Musy, A. (eds), IAHS Publ. 193.

- Bunte, K. 1992. Particle number grain-size composition of bedload in a mountain stream, p 55-72 *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P. Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi, (eds), Wiley, Chichester.
- Burgurlu, B. 1977. A study of sediment transport in river Gaula. Dr. Ing. avhandling. Institutt for Vassbygging, NTH, 160 s.
- Butler, P. R. 1977. Movement of cobbles in a gravel-bed stream during a flood season. *Geological Society of America Bulletin*, **88**, 1072-1074.
- Bønsnes, T. E. & Bogen, J. 1995. Sedimenttransport i Sogna, Vikka og Risa ved Gardemoen hovedflyplass i 1994, NVE Rapport 12.
- Carling, P. A., 1988. Channel change and sediment transport in regulated UK rivers. *Regulated Rivers: Research & Management*, **2**, 369-387.
- Carter Johnson, W. 1997. Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers: Research & Management*, **13**, 403-415.
- Chacho, E. F. Jr., Emmet, W. W. & Burrows, R. L. 1994. Monitoring Gravel Movement using Radio Transmitters, p 785-789 in: *Hydraulic Engineering '94*, G. V. Cotroneo & R. R. Rumer, (eds). *Proceedings of the 1994 Conference, Buffalo Aug 1-5, 1994*.
- Chang, H. H. 1988. Fluvial processes in river engineering. Wiley, New York, 432 p.
- Church, M. & Jones, D. 1982. Channel bars in gravel-bed rivers, p 291-338 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester.
- Church, M. McLean, D. G. & Wolcott, J. F. 1987. River bed gravels: sampling and analysis. p 43-88 in: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.
- Church, M., 1995. Geomorphic response to river-flow regulation: case studies and time scales. *Regulated Rivers: Research & Management*, **11**. 3-22.
- Collins, B & Dunne, T. (1990) Fluvial geomorphology and river gravel mining: A guide for planners, case studies included. California Division of Mines and Geology Special Publication 98, 29 p.
- Crickmore, M. J., Tazioli, G. S., Appleby, P.G. & Oldfield, F. 1990. The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems. *Technical Documents in Hydrology*, IHP-III Project 5.2., UNESCO, Paris, 170 p.
- Custer, S. G., Bugosh, N., Ergenzinger, P. E. & Anderson, B. C. 1987. Electromagnetic detection of pebble transport in streams: a method for measurement of sediment-transport waves, p 21-26 in: *Recent developments in fluvial sedimentology. Third Int. Fluvial Sedimentology Conf.*, F. G. Ethridge, R. M. Flores, M. D. Harvey (eds). *Soc. Econ. Pal. & Min. Spec. Publ. no. 39*.

- Dahl, T. E. & Godtland, K. 1995. Sedimenttransport i bratte elver. Studie i Gaula i Sør-Trøndelag. Rapportnr. STF60 A95112. SINTEF-NHL. Trondheim, 49 s.
- Dalviken, K. 1992. SELSIM – a computer model for estimation of bed load transport, p 58-62 in: *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*, J Bogen (ed), Proceedings of the Oslo symposium - Poster Contributions. IAHS 1992.
- de Jong, C. 1995. Temporal and spatial interactions between river bed roughness, geometry, bedload transport and flow hydraulics in mountain streams – examples from Squaw Creek (Montana, USA) and Lainbach/ Schmeidlaine (Upper Bavaria, Germany). Ph.D. avhandling. Berliner Geographische Abhandlungen, Heft 59. Berlin, 190 s.
- Dinehart, R. L. 1989. Dune migration in a steep coarse bedded stream. *Water Resources Research*, **25**, 911-923.
- Dinehart, R. L. 1992 a. Evolution og coarse-gravel bedforms: Field measurements at flood stage. *Water Resources Research*, **28**, 2667-2689.
- Dinehart, R. L. 1992 b. Sonar monitoring of gravel-transport processes at a stream gauging station in a disturbed watershed, p 71-76 in: *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*, J. Bogen (ed). Proceedings of the Oslo symposium - Poster Contributions. IAHS 1992.
- Dingman, L. 1984. Fluvial Hydrology. W. H. Freeman & Company, New York, 383 p.
- Downs, P. W. & Brooks, A. 1994. Developing a standard geomorphological approach for the appraisal of river projects, p 299-323 in: *Integrated River Basin Development*, C. Kirby & W. R. White (eds). Wiley, Chichester.
- Druffel, L., Emmet, W. W., Schnieder, V. R. & Skinner, J. V. 1976. Laboratory hydraulic calibration of the Helley-Smith bedload sediment sampler. U.S. Geological Survey Open File Report, 76-752.
- DuBoys, P. 1879. Le Rhone et les Rivières a Lit Affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées*, **18**, Series 5, 141-195.
- Duizendstra, H.D. & Nieuwenhuijzen, M.E. 1995. Ecological rehabilitation and morphological impact of gravel extraction in the river Meuse. *Water Science and Technology*, **31**, 375-361.
- Ehrenberger, R. 1931. Direkte Geschiebemessungen an der Donau bei Wien und deren bisherige Ergebnisse, *Die Wasserwirtschaft*, **34**. 1-9.
- Einstein, H. A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *U.S. Dep. of Agriculture Technical Bulletin*, No. 1026.
- Elster, M. C. 1987. Sedimentasjonsforløpet på et suspensjonsdelta: Bøvrås delta i Vågåvatn. H.oppgave ved Geografisk inst., Universitetet i Oslo.

- Emmet, W. W. 1980. A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bed load sampler, *USGS Prof. Paper*. 1139, Washington DC, 44p.
- Emmet, W. W. 1981. Measurement of bedload in rivers, p 3-15 in: *Erosion and Sediment Transport Measurement*. IAHS Publ. 133.
- Engel, P. & Lau, L. 1981. The efficiency of basket type bedload samplers, p 27-34 in: *Erosion and Sediment Transport Measurement*. IAHS Publ. nr. 133.
- Engen, A. K. 1981. Sedimenttransport og formutvikling i Etna-Dokka-vassdragets nedre deler. H.oppgave ved Geografisk inst., Universitetet i Oslo.
- Ergenzinger, P.J. & Conrady, J. 1982. A new tracer technique for measuring bedload in natural channels. *Catena*, **9**, 77-80.
- Ergenzinger, P. J. & Custer, S.G. 1983. Determination of bedload transport using natural magnetic tracers: First experience at Squaw Creek, Gallatin County, Montana. *Water Resources Research*. **19**, 187-193.
- Ergenzinger, P. 1988. The nature of coarse material bed load transport, p 207-216 in: *Sediment Budgets* M. P. Bordas & D. E. Walling (eds), IAHS Publ. nr. 174
- Ergenzinger, P. Schmidt, K.H. & Busskamp, R. 1989. The Pebble Transmitter System (PETS) first results of a technique for studying coarse material erosion, transport and deposition. *Zeitschrift für Geomorphologie*. **33**, 503-508.
- Ergenzinger, P. J. & Schmidt, K. H. 1990. Stochastic elements of bed load transport in a step pool mountain river, p 39-46 in: *Hydrology in Mountainous Regions II – Artificial Reservoirs; Water and Slopes*, IAHS Publ. no. 194.
- Ergenzinger, P. J. & Jupner, R. 1992. Using COSSY (Cobble Satellite System) for measuring the effects of lift and drag forces, p 41-49 in: *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*. J Bogen, D. E. Walling & T. J. Day (eds), IAHS Publ. no. 210.
- Ergenzinger, P. J. 1992. Riverbed adjustments in a step-pool system: Lainbach, Upper Bavaria, p 415-430 *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P.Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester
- Erlandsen, A. 1991. Etterundersøkelser i Skjoma – rydding av elvekantvegetasjon i flomløp. A. Kroken & P. E. Faugli (red), *Etterundersøkelser i Skjoma*, NVE Publikasjon, Nr. 14, Oslo.
- Everitt, B., 1993. Channel responses to declining flow on the Rio Grande between Ft. Quitman and Presido, Texas. *Geomorphology*, **6**, 225-242.
- Fergus, T. 1993. Geomorphological adjustments of the channel after river regulation for hydropower in the Fortun, Sogn and Fjordane, Norway. *Rapportserie: Hydrologi, Universitetet i Oslo*, 75 s.

- Fergus, T. 1997. Geomorphological response of a river regulated for hydropower: River Fortun, Norway. *Regulated Rivers: Research & Management*, **13**, 449-461.
- Fergus, T. 1998. Bunntransport i vassdrag. Litteratursøk. HM-Notat, 5/98. Norges vassdrags- og energiverk.
- Ferguson R. I. & Ashworth, P. J. 1992. Spatial Patterns of bedload transport and channel change in braided and near-braided rivers, p 477-496 in: *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P. Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester.
- Fletcher, W. B. 1987. Geomorphological consequences of the channelization of the river Rena, Hedmark. Noway. *Rapportserie: Hydrologi, Universitetet i Oslo*, nr. 18, 162 s.
- Fremstad, E. 1985. Flerbruksplan for vassdrag i Gudbrandsdalen. Botaniske undersøkelser 1. Invertering av flommarkene langs Lågen. *Økoforsk rapp. 1985*, nr. 3, 184 s.
- Frostick, L. E., Lucas, P. M. & Reid, I. 1984. The infiltration of fine matrices into coarse grained alluvial sediments and its implications for stratigraphical interpretation. *Journal of the Geological Society London*, **141**, 955-965.
- Galay, V. J. 1983. Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, **19**, 1057-1090.
- Gessler, J. 1970. Beginning and ceasing of sediment motion. *Proceedings of the Institute of River Mechanics*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Germanoski, D. and Ritter, D.F., 1988. Tributary Response to Local Base level Lowering Below a Dam. *Regulated Rivers: Research & Management*, **2**, 11-24.
- Gilvear, D. & Bradley, S. 1997. Geomorphological adjustment of a newly engineered upland sinuous gravel-bed river diversion: Evan Water, Scotland. *Regulated Rivers: Research & Management*, **13**, 377-389.
- Gintz, D., Hassan, M. A. & Schmidt, K. 1996. Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 433-445.
- Goff, J. R. & Ashmore, P. E. 1994. Gravel transport an morphological change in braided Sunwapta River, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, **19**, 195-212.
- Gomez, B. 1983. Temporal variations in bedload transport rates: the effect of progressive bed armouring. *Earth Surface Processes and Landforms*, **8**, 41-54.
- Gomez, B. 1987. Bedload, p 355-376 in: *Glacio-fluvial Sediment Transfer, an alpine perspective*. A. Gurnell & M. Clark (eds), Wiley, Chichester.
- Gomez, B. & Church, M. 1989. An assessment of bed-load sediment transport formulae for gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, **25**, 1161-1186.
- Gomez, B., Naff, R. L. & Hubbel, D. W. 1989. Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 135-156.

- Gomez, B. 1991. Bedload transport. *Earth-Science Reviews*, **3**, 89-132.
- Gomez, B. 1995. Bedload transport and changing grain size distributions, p 178-199 in: *Changing River Channels*, A. Gurnell & G. Petts (eds), Wiley, Chichester.
- Govi, M., Maraga, F. & Moia, F. 1993. Seismic detectors for continuous bed load monitoring in a gravel stream. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, **38**, 123-132.
- Gregory, K. J. & Park, C. 1974. Adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir. *Water Resources Research*, **10**, 870-873.
- Grundt, Ø. 1996. Koppangsøyene i Glomma. En fluvialgeomorfologisk undersøkelse med vekt på perioden etter Rendalen overføringen i 1971. Hovedoppgave, Geografisk institutt, Universitetet i Oslo, 77 s.
- Gurnell A. M. 1983. Downstream channel adjustments in response to water abstraction from hydroelectric power generation from alpine glacial melt-water streams. *Geographical Journal*, **149**, 342-354.
- Gurnell, A. M., Clark, M. J. & Hill, C. T. 1990. The geomorphological impact of modified river discharge and sediment transport regimes downstream of hydropower scheme meltwater intake structures, p 165-170 in: *Hydrology in Mountainous Regions II – Artificial Reservoirs; Water and Slopes*, IAHS Publ. no. 194.
- Gurnell, A. M. 1995. Vegetation along river corridors: Hydrogeomorphological interactions, p 237-260 in: *Changing River Channels*, A. M. Gurnell & G. E. Petts (eds), Wiley, Chichester.
- Habersack, H. M. 1994. Development of a measurement technique to monitor continuously sediment transport in a large Austrian river, p 39-43 in: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport*. L. J. Olive & J. A. Kesby (eds), *Poster Contributions. IAHS Conf. Canberra*.
- Habersack, H. & Nachtnebel, H. P. 1995. Short-term effects of local river restoration on morphology, flow field, substrate and biota. *Regulated Rivers: Research & Management*, **10**, 291-301.
- Habersack, H. M. 1996. Lack and surplus of sediments being transported by river systems, p 565-573 in: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, D. E. Walling & B. E. Webb (eds), IAHS Publ. no. 236.
- Hallet, B., Hunter, L. & Bogen, J. 1996. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications. *Global and Planetary Change*, **12**, 213-235.
- Harvey, A. M. 1987. Sediment supply to upland streams: Influence on channel adjustments, p 121-150 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.

- Harvey, A. M. 1991. The influence of sediment supply on the channel morphology of upland streams: Howgill Fells, northwest England. *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 675-684.
- Hassan, M. A. , Schick, A. P. & Laronne, J. P. 1984. The recovery of flood-dispersed coarse sediment particles. A three dimensional magnetic tracing method. *Catena Supplement 5*, Braunsweig.
- Hassan, M. A. & Reid, I. 1990. The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 739-750.
- Hassan, M. A., Church, M. & Schick, A. P. 1991. Distance of movement of coarse particles in gravel-bed streams. *Water Resources Research*, **27**, 503-511
- Hassan, M. A. & Church, M. 1992. The movement of individual grains on the streambed, p 159-175 in: *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P.Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester.
- Hassan, M. A., Church, M. & Ashworth, P. J. 1992. Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 617-627.
- Hayward, J. A. & Sutherland, A.J. 1974. The Torlesse Stream vortex-tube sediment trap. *Journal of Hydrology, New Zealand*, **13**,41-53.
- Hayward, J. A. 1980. Hydrology and stream sediment from Torlesse Stream catchment. Ph.d. thesis. Tussock Grasslands & Mountain Lands Institute Spec. Publ. no. 17. Lincon College, Canterbury, New Zealand, 229 p.
- HEC-6, 1993. Scour and deposition in rivers and reservoirs, Users manual. US Army Corps of Engineers, Davis, USA.
- Helley, E.J. & Smith, W. 1971. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler. *Open-File Report*, U.S. Geological Survey.
- Hoey, T. B. 1992. Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, **16**, 319-338.
- Hoey, T. B. & Ferguson, R. 1994. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel-bed rivers: Model development and illustration. *Water Resources Research*, **30**, 2251-2260.
- Howard, A. & Dolan, R. 1981. Geomorphology of the Colorado River in the Grand Canyon. *Journal of Geology*, **89**. 269-298.
- Huang, J. 1992. Application of sandwave measurements in calculating bed load discharge. *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*, J Bogen, D. E. Walling & T. J. Day (eds), IAHS Publ. nr. 210.

- Hubbell, D.W., Stevens, H.H., Skinner, J. V. & Beverage, J. P. 1985. New approach to calibrating bedload samplers. *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., J. Hydraul. Eng.*, 111.Pp 677-694
- Hubbell, D.W. 1987. Bed load sampling and analysis, p 89-118 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.
- Itakura, Y., Taniguchi, S., Miyamoto, K. & Shimokawa, E. 1994. Acoustic sensor for detecting the occurrence of debris flows, p 53-56 in: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport, Poster Contributions*. L. J. Olive & J. A. Kesby (eds), *IAHS Conf. Canberra*.
- Itakura, Y., Kamei, N., Takahama, J. & Nowa, Y. 1996. Realtime estimation of discharge of debris flow by an acoustic sensor, p 127-131, *Proceedings of XIV IMEKO World Congress*, Tampere, Finland, Vol. XA.
- Itakura, Y., Koga, Y., Takahama, J. & Nowa, Y. 1997. Acoustic detection sensor for debris flow p 747-756 in: *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. *Proceedings of First International Conference*, Water Resources Engineering Division/ASCE.
- Johnson, W. C. 1997. Equilibrium response of riparian vegetation to flow regulation in the Platte River, Nebraska. *Regulated Rivers: Research & Management*, **13**, 403-415.
- Kalinske, A. A. 1947. Movement of sediment as bedload in rivers. *Transactions*, American Geophysical Union, **28**, 615-620.
- Karlsen, O. G. 1971. Fluvialgeomorfologiske undersøkelser i Visa og de nedre deler av Bøvra. Hovedoppgave ved Geografisk institutt. Universitetet i Oslo.
- Kashef, A. I. 1981. Technical and ecological impacts of the Aswan High Dam. *Journal of Hydrology*, **53**, 73-84.
- Kellerhals R. 1982. Effect of river regulation on channel stability, p 685-715 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester.
- Kjeldsen, O., Østrem, G. & Olsen, H. C. 1975. Materialtransportundersøkelser i norske bre-elver 1974. NVE Rapp. nr. 3/75.
- Kjeldsen, O. & Østrem, G. 1977. Materialtransportundersøkelser i norske bre-elver 1975. NVE Rapp. nr. 3/77.
- Klingemann, P.C. & Milhous, R. T. 1970. Oak Creek Vortex Bed Load Sampler, *17th Annual Pacific North-West Meeting of the Am. Geophys. Union. Washington*. 17 pp.
- Klingemann, P.C. & Emmet, W. 1982. Gravel bedload transport processes, p 141-179 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester
- Knighton, A.D. 1988. The impact of the Parangana Dam on the River Mersey, Tasmania. *Geomorphology*, **1**, 221-237.

- Kondolf, G. M. & Mathews, V. W. G. 1986. Transport of tracer gravels on a coastal California river. *Journal of Hydrology*, **85**, 265-280.
- Kondolf, G. M. & Swanson M.L. 1993. Channel adjustments to reservoir construction and gravel extraction along Stony-Creek, California. *Environmental Geology*, **21**, 256-269.
- Kuhnle, R.A., Willis, J.C. & Bowie, A.J. (1988). Measurement of bedload transport on Goodwin Creek, northern Mississippi, p 57-60 in: *Proc. 18th Mississippi Water Resources Conference*, Hawkins, E. J. (ed).
- Kuhnle, R.A. 1992. Fractional transport rates of bedload on Goodwin Creek, p 141-155 in: *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P.Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester.
- Lahusen, R. G. 1996. Detecting debris flows using ground vibrations. *U.S. Geological Survey, Fact Sheet* 236-96.
- Lane, S. N. 1997. The reconstruction of bed material yield and supply histories in gravel-bed streams. *Catena*, **30**, 183-196.
- Laronne, J. B. & Duncan, M. J. 1992. Bedload transport paths and gravel bar formation, p 177-202 in: *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P.Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester.
- Laronne, J. B., Reid, I., Yitshak, Y. & Frostick, L. E. 1992 a. Recording bedload discharge in a semiarid channel, Nahal Yatir, Israel, p 79-86 in: *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*, J Bogen, D. E. Walling & T. J. Day (eds), IAHS Publ. nr. 210.
- Laronne, J. B., Outhet, D. N., Duckham, J. L. & McCabe, T. J. 1992 b. Determining event bedload volumes for evaluation of potential degradation sited due to gravel extraction, N. S. W., Australia, p 87-94 in: *Erosion and Sediment Monitoring Programmes in River Basins*, J Bogen, D. E. Walling & T. J. Day (eds), IAHS Publ. nr. 210.
- Leeks, G. J., Lewin, J. & Newson, M. D. 1988. Channel change, fluvial geomorphology and river engineering: the case of the Afon Trannon, mid-Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, **13**, 207-223.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. & Miller, J. P. 1964. Fluvial processes in geomorphology. Freeman. San Francisco.
- Long, Y. 1989. Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. *Operational Hydrology Report* **nr. 29**. WMO, Nr. 686. Geneve.
- Maheshwari, B. L., Walker, K. F. & McMahon, T. A. 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management*, **10**, 15-38.
- Marston, R. A., Girel, J., Pautou, G., Piegay, H., Bravard, P., Arneson, C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, **13**, 121-131.

- Martin, Y. & Church, M. 1995. Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **20**, 347-361.
- Meyer-Peter, E., Favre, H. & Einstein, H. A. 1934. Neuere versuchsresultate uber den geschiebetrieb. *Schwiez. Bauztg.*, **103**, 147-150.
- Meyer-Peter, E. & Muller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. *International Assosiation for Hydraulic Structures Research, Second Meeting, Stockholm 1948. Appendix 2.*
- Moattassen, M. El. & Abdelbary, M. R. 1993. Bed degradation and channel shifting in the Nile after Aswan high dam, p 266-279 in: *International Symposium on High Aswan Dam, 61st Executive meeting and Symposium*. Egyptian National Committee on Large Dams (ENCOLD).
- Mosely, M. P. & Tindale, D. S. 1984. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 465-482.
- Mosevoll, G. & Torsethaugen, K. 1976. Erosjonsforhold ved Store Målsvatn, Rana. Samlerapport 1973-jan. 1976. STF60 A 76042. NHL.
- Muhlhofer, L. 1933. Untersuchungen uber die Schwebstoff- und Geschiebefurung des Unn nachst Kirchbichl. *Die Wasserwirtschaft*, Nr 1-6.
- Naden, P. S. 1988. Models of sediment transport in natural streams, p 217-258 in: *Modelling Geomorphological Systems*, M. G. Anderson (ed), Wiley, Chichester.
- Newson, M. D. & Leeks, G. J. 1987. Transport processes at the catchment scale, p 187-223 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.
- Nicholas, A. P., Ashworth, P. J., Kirkby, M. J., Macklin, M. G. & Murray, T. 1995. Sediment slugs: large scale fluctuations in fluvial sediment transport rates and storage volumes. *Progress in Physical Geography*, **19**, 500-519
- Ning, C. 1985. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 143-159.
- NOU, 1996. Tiltak mot flom. NOU 1996: 16, Oslo, 207 s.
- Oddland, A. 1993. Flora og vegetasjon, s 153-176 i: *Inngrep i vassdrag; konsekvenser og tiltak – en kunnskapsoppsummering – Bind 1*, P. E. Faugli, A. H. Erlandsen & O. Eikenæs (red), NVE Publ. nr. 13, Oslo.
- Oldfield, P. Thomson, F. R. & Dickson, D. P. E. 1981. Artificial enhancement of stream bedload: a hydrological application of superparamagnetism. *Physics of the Earth and Planetary Systems*, **26**, 107-124
- O'Leary, S.J. & Beschta, R.L. 1981. Bed-load transport in an Oregon Coast Range stream. *Water Resources Bulletin*, **17**, 886-894.

- Page, K.J. & Heerdegen, R.G. 1985. Channel change on the lower Manawatu river. *New Zealand Geographer*, **41**, 35-38.
- Parker, G., Klingeman, P. C. & McLean, D. G. 1982. Bed-load and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **108**, 544-571.
- Petit, F., Poinart, D & Bravard, J. P. 1996, Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhone river upstream of Lyon, France ("canal de Mirabel"). *Catena*, **26**, 209-226.
- Petts, G. E. 1977. Channel response to flow regulation: The case of the river Derwent, Derbyshire: p 145-64 in *River Channel Changes*, K. J. Gregory (ed.), Wiley, Chichester.
- Petts, G. E. 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography*, **3**, 329-362
- Petts, G. E. 1984a. Impounded Rivers. Wiley, Chichester.
- Petts G.E. 1984b. Sedimentation within a regulated river. *Earth Surface Processes and Landforms*, **9**, 125-134.
- Petts, G. E & Thoms, M. C. 1987. Morphology and sedimentology of a tributary confluence bar in a regulated river: North Tyne, U. K.. *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 433-440.
- Pickup, G. 1980. Hydrologic and sediment modelling studies in the environmental impact assessment of a major tropical dam project. *Earth Surface Processes and Landforms*, **5**, 61-75.
- Pickup, G. 1988. Hydrology and sediment models, p 153-215 in: *Modelling Geomorphological Systems*, M. G. Anderson (ed), Wiley, Chichester.
- Pitlick, J. C. & Thorne, C. R. 1987. Sediment supply, movement and storage in an unstable gravel-bed river, p 151-183 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.
- Reid, I., Layman, J.T. & Frostick, L.E. 1980. The continuous measurement of bedload discharge. *Journal of Hydraulic Research*, **18**, 243-249.
- Reid, I., Brayshay, A.C. & Frostick, L.E. 1984. An electromagnetic device for automatic detection of bedload motion and its feild applications. *Sedimentology*, **31**, 269-276.
- Reid, I., Frostick, L.E., & Layman, J.T. 1985. The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**. 33-44.
- Reid, I., Frostick, L.E. 1986. Dynamics of bedload transport in Turkey Brook, a coarse-grained alluvial channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 143-155.

- Reid, I. & Frostick, L.E. 1987. Toward a better understanding of bedload transport, p 13-19 in: *Recent developments in fluvial sedimentology. Third Int. Fluvial Sedimentology Conf.*, F. G. Ethridge, R. M. Flores, M. D. Harvey (eds), *Soc. Econ. Pal. & Min. Spec. Publ. nr. 39*.
- Reid, I., Frostick, L.E. & Brayshay, A.C. 1992. Microform roughness elements and the selective entrainment and entrapment of particles in gravel-bed rivers, p 253-275 in: *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, P. Billi, R. D. Hey, C. R. Thorne & P. Tacconi (eds), Wiley, Chichester.
- Richards, K. S. & Milne, L. M. 1979. Problems in the calibration of an acoustic device for the observation of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, **4**, 335-346.
- Richards, K. S. 1990. Fluvial geomorphology: initial motion of bed material in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, **14**, 395-415.
- Rickenmann, D. 1994. Bedload transport and discharge in the Erlenbach stream, p 53-66 in: *Lecture Notes in Earth Sciences*, **52**, P. Ergenzinger & K. H. Schmidt (eds). Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers, Springer-Verlag, Berlin.
- Rickenmann, D. 1997. Sediment transport in Swiss torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**, 937-951.
- Schmidt, K. H. & Ergenzinger, P. 1992. Bedload entrainment, travel length, step length, rest periods studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 147-165.
- Schmidt, K. H. & Gintz, D. 1993. Results of bedload tracer experiments in a mountain river, p 37-54 in: *River Geomorphology*, E. J. Hickin (ed), Wiley, Chichester.
- Schmidt, J. C., Grams, P. E. & Webb, R. H. 1995. Comparison of the magnitude of erosion along two large regulated rivers. *Water Resources Bulletin*, **31**, 617-631.
- Schoklitsch, A.. 1934. Der geschiebetrieb und die geschiebefracht. *Wasserkraft Wasserwirtschaft*, **4**, 1-7.
- Schoklitsch, A.. 1962. Handbuch der Wasserbaue, Springer-Verlag, Wien.
- Schumm, S. A. & Galay, V. J. 1994. The river Nile in Egypt. *The Variability of Large Alluvial Rivers*. S. A. Schumm & B. R. Winkley (eds), ASCE Press, New York.
- Sear, D. A. 1995. Morphological and sedimentological changes in a gravel-bed river following 12 years of flow regulation for hydropower. *Regulated Rivers: Research & Management*, **10**, 247-264.
- Sear, D. A. & Archer, D. R. 1995. The effects of gravel extraction on the stability of gravel-bed rivers: a case study from the Wooler Water, Northumberland, UK. Fourth Gravel-Bed Rivers Conference.
- Simon, A. 1989. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 11-26.

- Simons, D. B. & Simons R. K. 1987. Differences between gravel- and sand-bed rivers, p 3-15 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds). Wiley, Chichester.
- Smart, G. M. & Jaeggi, M. N. R. 1983. Sediment transport on steep slopes. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Zurich.
- Smart, G. M. 1984. Sediment transport formulae for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, **110**, 267-276.
- Spreafico, M. & Lehmann, C. 1994. Sediment transport observations in Switzerland, p 259-268 in: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport*, L. J. Olive, R. J. Loughran & J. A. Kesby (eds), IAHS Publ. no. 224.
- Svantesvold, A. 1980. Virkninger av reguleringen i Hallingdalselva. H. oppgave ved Geografisk institutt, Universitetet i Oslo.
- Sætebø, E., Roen, S., Syvertsen, L. & Tesaker, E. 1998. Vassdragshåndboka. Tapir forlag. Oslo.
- Tacconi, P. & Billi, P. 1987. Bed-load transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio Creek, Italy, p 583-616 in: *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, C. R. Thorne, J. C. Bathurst, & R. D. Hey (eds), Wiley, Chichester.
- Tesaker, E. & Dahl, T. E. 1992. Monitoring of suspended sediment concentration in discharge from regulated lakes in glacial deposits, p 269-278 in: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. J Bogen, D. E. Walling & T. J. Day (eds), IAHS Publ. 210.
- Thomas, W. A.. 1982. Mathematical modelling of sediment movement, p 487-511 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester
- Thoms, M. C. & Walker, K. F. 1993. Channel changes associated with two adjacent weirs on a regulated lowland alluvial river. *Regulated Rivers: Research & Management*, **8**, 271-284.
- Tywoniuk, N. & Warnock, R. G. 1973. Acoustic detection of bed-load transport, p 728-743 in: *9th National Research Council Hydrology Symposium, Canada*.
- Wathen, S.J., Ferguson, R. I., Hoey, T. J. & Werrity, A. 1995. Unequal mobility of gravel and sand in weakly bimodal river sediments. *Water Resources Research*, **31**, 2087-2096.
- Weiss, F. 1996. Sediment monitoring, long-term loads, balances and management strategies in southern-Bavaria, p 575-582 in: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, D. E. Walling & B. E. Webb (eds) IAHS Publ. no. 236.
- White, W. R. & Day, T. J. 1982. Transport of graded gravel bed material, p 181-223 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester

Williams G. P. & Wolman M. G. (1984) Downstream effects of dams on alluvial rivers. *US Geological Survey Professional Paper*. No. 1286, 83 p.

Winkley, B. R. 1982. Response of the lower Mississippi to river training and alignment, p 659-681 in: *Gravel-bed Rivers*, R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne (eds), Wiley, Chichester

Wyzga, B. 1993. River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 541-556.

Xu, Jiongxin, 1990. Complex response in adjustment of the Weihe River channel to the construction of the Sanmenxia Reservoir. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **34**, 233-245.

Xu, Jiongxin,. 1996. Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. *Geomorphology*, **17**, 351-359.

Østrem, G., Ziegler, T. & Ekman, S. R. 1970. Slamtransportundersøkelser i Norske bre-elver 1969. NVE Rapp. nr. 6/70.

Østrem, G. 1975. Sediment transport in glacial meltwater streams, p 101-162 in: *Glacifluvial and Glaciolacustrine Sedimentation*, A. Jopling & B. G. McDonald (eds). Soc. Econ. Pal. Min. Spec. Publ. no. 23.

Østrem, G. 1988. Nigardsbreen. Part of Jostedalsbreen Southern Norway. Kart, NVE, Hydrologisk avd. 1988.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energiverk (NVE)
Adresse: Postboks 5091 Majorstua, 0301 Oslo

I 1998 ER FØLGENDE RAPPORTER UTGITT:

- Nr 1 Oslo Energi Konsult: Sluttbrukertiltak og lokal kraftsystemplanlegging. (55 s.)
- Nr 2 Halfdan Benjaminsen, Jim Bogen, Truls Erik Bønsnes:
Suldalslågens sedimentkilder. Fotoregistrering 1997 (149 s.)
- Nr 3 Liss M. Andreassen: Volumendringer på Jostefonn 1966 - 93 (10 s.)
- Nr 4 Tharan Fergus og Jim Bogen: Bunntransport i vassdrag - en gjennomgang av
internasjonal litteratur (50s.)

**NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIDIREKTORAT**



72026749