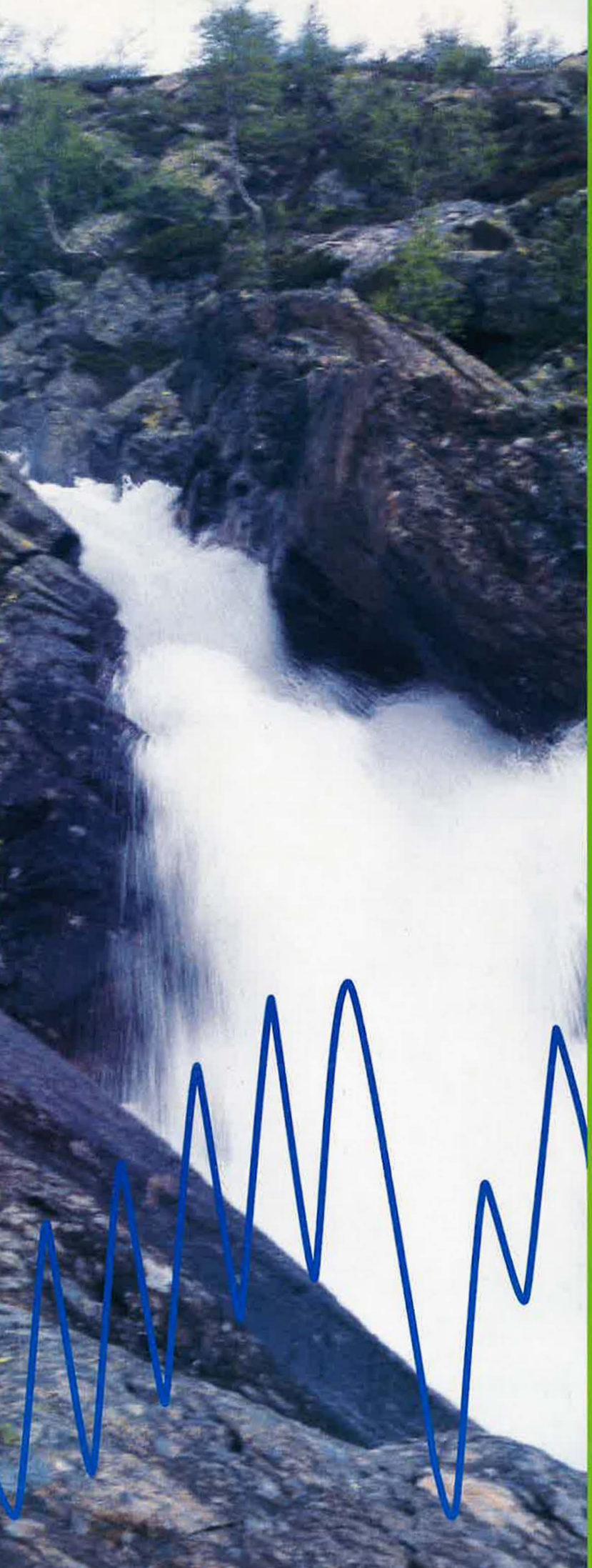


Rapport nr. 12

Effektregulering og grunnvannserosjon – analyser og tiltak.

Effekt-regulering – Miljø-virkninger og konflikt-reduserende tiltak

Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak

FoU-prosjektet Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak er et prosjekt under Norges Forskningsråds Effekt-program. Prosjektet startet i 1996 og planlegges sluttført i år 2000.

Økt kraftutveksling med utlandet aktualiserer økte effektinstallasjoner og endret kjørestrategi i eksisterende og i nye kraftverk. Prosjektet fokuserer på miljøvirkninger av økt døgnregulering som synes å bli den mest aktuelle formen for effektregulering i Norge.
Særtrekk ved effektregulering er raskere endringer i de fysiske forholdene i vassdraget enn de vi er vant med ved dagens kraftverksdrift. Slike endringer vil påvirke vassdragsmiljøet på en ny måte og vil i mange tilfeller kreve nye tillatelser fra myndighetene.
Vi har så langt lite systematisert kunnskap om miljøvirkninger knyttet til døgnregulering og annen effektregulering av kraftverk.

Hovedmålsettingene for prosjektet er derfor å:

- oppgradere kunnskapen om miljøvirkninger av effektregulering
- utvikle avbøtende tiltak som kan redusere eller eliminere negative virkninger

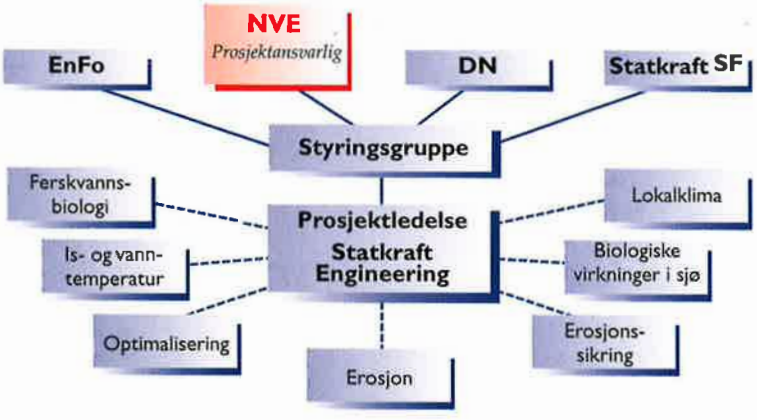
Gjennom økte kunnskaper vil utbyggere og forvaltning få et bedre grunnlag for å vurdere miljøkonsekvenser ved effektregulering og for å vurdere effektiviteten av avbøtende tiltak.

Prosjektet vurderer miljøvirkninger av effektregulering i innlandsvassdrag med vekt på virkninger i små og mellomstore innsjøer/magasin. Som eksempelvassdrag er valgt deler av Tokke-reguleringen. To delprosjekter tar i tillegg for seg mulige virkninger av økt effektregulering på biologiske forhold i fjorder.

Norges vassdrags- og energiverk (NVE) er prosjektansvarlig. Det er i tillegg etablert en styringsgruppe for prosjektet som består av representanter for Direktoratet for naturforvaltning (DN), Energiforsyningens fellesorganisasjon (EnFO), Statkraft SF og NVE. Daglig prosjektledelse utføres av Statkraft Engineering as.

Prosjektet er inndelt i seks delprosjekter knyttet til innlandsvassdrag og to delprosjekter knyttet til fjord. Delprosjektene knyttet til innlandsvassdrag dekker fagområdene: is- og vanntemperatur, erosjon, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering med hensyn på teknikk, miljø og økonomi. Fjordprosjektene omfatter problemstillinger knyttet til effektregulering og virkning på fisk og algevekst.

Utførende institusjoner er: Universitetet i Bergen, Det norske meteorologiske institutt, Norsk institutt for vannforskning (NIVA), NVE, Statkraft Engineering og Universitetet i Oslo.



Ytterligere informasjon om prosjektet og publikasjoner i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak får du ved å kontakte:

Prosjektleder Elise Førde
Statkraft Engineering as
Postboks 191
1322 HØVIK

Tlf: 67 57 70 10
Fax: 67 57 70 11

 Forsidefoto: Vegard Pettersen

EFFEKTREGULERING – MILJØVIRKNINGER OG KONFLIKTREDUSERENDE TILTAK

Delprosjekt 1.4 og 1.5

TITTEL: Effektregulering og grunnvannserosjon – analyser og tiltak	**RAPPORT NR. 12**
DELPROSJEKTANSVARLIG: Jim Bogen og Einar Beheim	**INSTITUSJON:** NVE
FORFATTER: Aslak Løvoll, Kevin Tuttle og Hans K. Fritzvold	**INSTITUSJON:** Norconsult

SAMMENDRAG:
Rapporten tar for seg virkningene av effektregulering på grunnvann, stabilitet og erosjon i bredden til et magasin eller en elv. Faktorer av betydning for stabilitet og erosjon av lave skråninger (2-4 m høye) m.h.t. effektregulering er diskutert og vurdert v.h.a. analyser med grunnvannsmodellen SEEP og stabilitetsmodellen SLOPE. Modellene beregner poretrykk i mettet og umettet sone, kapillare effekter, effekten av vegetasjon og retning og størrelse på en grunnvannstrøm som varierer med tiden.

Simuleringene antyder at de beregnede skråninger er stabile mot større utglidninger. Overflaten av skråningen er derimot utsatt når grunnvannsgradienten er stor (ved fine masser og regulering over døgn). Da kan man få små lokale utrasninger som på sikt kan endre skråningen så mye at større utglidninger kan skje. Effektregulering gjør at store grunnvannsgradienter oppstår med en mye høyere frekvens enn det som er naturlig. Dette vil akselerere erosjonsprosessen.

Aktuelle tiltak bør rettes mot skråningsfot og reguleringssone. I tillegg til tradisjonelle sikringsmetoder kan det være aktuelt å endre reguleringsforløpet.

ABSTRACT:
This study discusses the effect of peak power production on ground water flow, stability and erosion of reservoir- or riverbanks.

Two different banks were studied with the groundwater model SEEP and the slope stability model SLOPE. The simulations show that the banks are stable to major slides, but the surfaces are unstable due to large fluctuating gradients in the fine material. This will accelerate the process of surface erosion.

Measures should concentrate on the foot of the bank and the level fluctuations in the river.

EMNEORD: Effektregulering, grunnvann, stabilitet, magasin, elv, erosjon, erosjonssikring

Tønsberg/Oslo desember 1999	Jim Bogen Delprosjektansvarlig	Einar Beheim Delprosjektansvarlig	Elise Førde Prosjektleder

ISBN 82-91904-13-8
ISSN 0809-5825

Innholdsfortegnesle

Symbolliste *4*

1. Sammendrag *5*

2. Innledning *6*

2.1. Bakgrunn **6**

2.2. Rapportens formål og innhold **6**

3. Generelt om vurdering av fare for utglidning/grunnvannserosjon som følge av effektregulering *7*

3.1. Stabilitet av naturlige, lave skråninger. **7**

3.2. Stabilitetsanalyse **9**

3.3. Andre faktorers innvirkning på skråningsstabiliteten **10**

3.3.1. Menneskelig aktivitet 10
3.3.2. Markfuktighet 10
3.3.3. Vegetasjon 12
3.3.4. Frost og solifluksjon 13
3.3.5. Sprekker 13

3.4. Faktorer som kan påvirke erosjonsforholdene **14**

3.4.1. Generelt 14
3.4.2. Betydning av grunnvann og gradient for erosjon 16

3.5. Rammebetingelser for grunnvannsmodellering og stabilitetsanalyse **17**

4. Grunnvannsmodellering *17*

4.1. Innledning **17**

4.2. Hydrogeologisk modell **18**

4.3. Simuleringer av poretrykk i umettet- og mettet sone **20**

4.4. Resultater **24**

5. Stabilitetsanalyse *26*

5.1. Innledning **26**

5.2. Modell/analyse **26**

5.3. Resultater **29**

5.3.1. Generelt 29
5.3.2. Tradisjonell stabilitetsanalyse 29
5.3.3. Stabilitetsanalyse vedrørende umettet sone over grunnvannsspeil og vegetasjon 31

6. Diskusjon - vurdering av erosjon / utglidning *33*

7. Sikringstiltak *36*

8. Konklusjon *37*

9. Videreføring av arbeidet *37*

10. Referanser *39*

Vedlegg

Faktorer som åpvirker erosjonsforholdene ..... **Vedlegg A**

Resultater fra grunnvannssimulering (SEEP/W) ..... **Vedlegg B**

Resultater fra stabilitetssimulering (SLOPE/W) ..... **Vedlegg C**

SYMBOLLISTE

A	(m^2)	Strømningsareal
c	(Pa ev. N/m^2)	Kohesjon
c'	(Pa)	Kohesjon på effektivspenningsbasis
d_{25}	(mm)	Diameter på korn som 25% av massen er finere enn.
d_{50}	(mm)	Diameter på korn som 50% av massen er finere enn; median diameter
d_{75}	(mm)	Diameter på korn som 75% av massen er finere enn.
H	(m)	Skråningshøyde
i	(m/m)	Grunnvannsgradient
i_{max}	(m/m)	Største grunnvannsgradient
K	(m/s)	Hydraulisk ledningsevne
L	(m)	Strømveiens lengde
Q	(m^3/s)	Vannføring
S_0	(mm/mm)	Sortering
S_r	(%/%)	Vannmetningsgrad
u_w	(Pa)	Poretrykk
α	(°)	Skråningsvinkel
γ	(N/m^3)	Tyngdetetthet ($\rho \cdot g$) til massen
γ_w	(N/m^3)	Tyngdetetthet ($\rho_w \cdot g$) til vann
γ'	(N/m^3)	Tyngdetetthet redusert for oppdrift = $\gamma - \gamma_w$
φ	(°)	Friksjonsvinkel
φ'	(°)	Friksjonsvinkel på effektivspenningsbasis
φ_b	(°)	Tillegg i friksjonsvinkel pga. kapillerkrefter
σ	(Pa)	Totalspenning
τ	(Pa)	Skjærspenning
ω	(°)	Effekt av utstrømmende grunnvann på overflatestabilitet. Gitt som tillegg i skråningsvinkel som funksjon grunnvannsgradientes størrelse og retning

EFFEKTREGULERING OG GRUNNVANNSEROSJON ANALYSER OG TILTAK

1. SAMMENDRAG

Effektregulering kan påvirke pågående, kontinuerlige prosesser i et vassdrag på en negativ måte i form av økt erosjon og redusert skråningsstabilitet.

Det må generelt foretas kartlegging av alle strekninger berørt av effektregulering for å vurdere fare for skadelig erosjon og ustabile skråninger.

Gjennomgangen av eksisterende litteratur viser at tradisjonell stabilitetsanalyse ikke kan gi en fullstendig modell for å fastslå virkningene av effektregulering på lave naturlige skråninger. Det er nødvendig å ta med effekten av vegetasjon og virkning av umettet sone. Dette er forsøkt i rapporten, og resultatene viser at stabiliteten av lave skråninger (2-4m) "kontrolleres" av vegetasjon og kapillære krefter. Det mangler imidlertid praktisk erfaring med størrelser på parametrene, og mer arbeid i felt anbefales for å oppnå dette.

Programmet SEEP er benyttet for å finne variasjonene i grunnvann ved varierende vannstand i elveløpet/magasinet. Resultatene gir beliggenhet av grunnvann for hvert tidssteg, poretrykk i hele skråningen (også umettet sone) og strømforholdene i skråningen. Dette gir et godt grunnlag for vurdering av forholdene for erosjon ved effektregulering.

Programmet SLOPE benytter de beregnede poretrykk fra SEEP og får dermed tatt hensyn til kapillære krefter i stabilitetsanalysen (i motsetning til tradisjonell stabilitetsanalyse). Effektregulering påvirker imidlertid flere faktorer av betydning for stabiliteten. SLOPE klarer derfor ikke å gi et fullstendig bilde.

Programmene er benyttet på to typiske skråninger bestående av løsmasseavsetninger som viser at lavest sikkerhet mot utglidning oppstår når man har:

- Høy skråning
- Finkorninge masser
- Hurtig vannstandsendring

Med de parametre som er valgt er selve skråningen stabil mot utrasninger, mens skråningsoverflaten lavere enn der grunnvannet strømmer ut er ustabil p.g.a. grunnvannstrømmens gradient og retning (f.eks. simulering 2 og 14). Faren for en ustabil overflate med erosjon og utglidninger er stor ved raske vannstandsvariasjoner og finkorninge masser (lav hydraulisk ledningsevne). I denne sammenheng er rask vannstandsvariasjon variasjon over døgnet. Denne erosjonen kan føre til dannelse av små raviner og mindre utrasninger som til slutt endrer stabiliteten av hele skråningen. Med tiden vil skråningen rase ut og stabiliseres og syklusen starter på nytt. Denne prosessen vil akselereres ved effektregulering ved at de ugunstige forhold med stor gradient gjentas regelmessig.

Problem med overflatestabiliteten er knyttet til området lavere enn grunnvannsutslaget. Dette kan være over vannstanden i elven/magasinet, men er som regel fra vannstanden og under. Ved eventuelle sikringstiltak er det denne delen av skråningen det må fokuseres på. Aktuelle sikringstiltak kan være de tradisjonelle med filterlag for drenering og støtte og overgangslag/plastring for erosjonssikring og støtte.

2. INNLEDNING

2.1. Bakgrunn

På grunn av liberaliseringen i kraftmarkedet og økningen i utvekslingskapasiteten vurderer flere kraftverkseiere å produsere for salg til Europa. For å møte etterspørselen der, som først og fremst gjelder perioder med høy last, ønsker man å øke effekten ved kraftverkene og produsere mer over kortere tid av døgnet. For kraftverk med utløp i elv kan dette gi en situasjon med raske vannstands- og vannføringsvariasjoner i elven. En slik situasjon gir andre påkjenninger og strømforhold i elven og elvebredden enn det som er vanlig. Dette vil blant annet påvirke stabilitet og erosjonsforholdene ved elveskråningene og mulighetene for rekreasjon ved vassdraget.

Ved kraftverkets inntak/magasin kan effektreguleringen også gi en situasjon med raske vannstands endringer. Man står da overfor tilsvarende problemer i strandsonen som i elvebredden.

Foto: Jim Bogen, NVE.

Figur 2-1. Fra erosjonsutsatt skråning ved innløpet til Øyeren

2.2. Rapportens formål og innhold

Formålet med rapporten er å gi en oversikt over betydningen effektregulering kan ha på stabilitet og erosjon i en elveskråning/strandsone samt foreslå aktuelle sikringstiltak.

Faktorer av betydning for stabilitet og erosjon av lave skråninger (2-4 m høye) m.h.t. effektregulering er diskutert i kapittel 3. Det er utført en følsomhetsanalyse på de viktigste av disse faktorene v.h.a. grunnvannsmodellen SEEP (kapittel 4) og stabilitetsmodellen SLOPE (kapittel 5). Disse håndterer grunnvann som varierer med tiden, kapillare effekter og effekten av vegetasjon.

Resultatene av denne analysen er diskutert (kapittel 6) og danner grunnlag for diskusjonen om sikringstiltak i kapittel 7. Ved gjennomføring av litteratursøk og analyse av skråningene ble det avdekket flere felt med behov for mer arbeid. Det er derfor satt opp forslag til videre arbeid i kapittel 9.

3. GENERELT OM VURDERING AV FARE FOR UTGLIDNING/GRUNNVANNSEROSJON SOM FØLGE AV EFFEKTREGULERING

3.1. Stabilitet av naturlige, lave skråninger.

Eksistensen av et vassdrag er et resultat av en langsom geomorfologisk prosess som innebærer kontinuerlig erosjon og sedimentasjon. Erosjon resulterer i sedimenttransport og sedimentasjon som gir oppbygging av bl.a. elvesletter. Slike sletter viser både en lagdelt natur (veksling mellom forskjellige massetyper) og en varvig natur (veksling av tynne sjikt innen samme massetype) avhengig av sedimentasjonsforholdene over tid. Massene i elvesletter består for det meste av mellomjordarter (silt-sand-fingrus), men kan variere fra fin silt til grus. Elveslettene ligger generelt med liten høyde over tilstøtende elv og er med sin masseoppbygging svært utsatt for erosjon. Karakteristisk for mange elvesletter er at de er bygget opp over korte tidsrom (noen hundre år). På elveslettene foregår sedimentasjon og erosjon side om side ved lett påvirkbare prosesser, for eksempel meandrering. Det skal kun små reguleringsendringer til før situasjonen endres helt for de mest utsatte elveslettene.

En regulering er en inngripen i denne prosessen med både økning og reduksjon av erosjonen inntil en ny likevekt har tilpasset seg. En effektregulering er en ytterligere virkning av reguleringen.

Naturlige erosjonsskråninger ut mot elver, bekker og vann er i utgangspunktet i en likevektssituasjon med lav stabilitet. De naturlige erosjonsprosessene på landsiden vil generelt bedre stabiliteten over tid ved å slake ut skråningen og gjøre den lavere. Erosjonen på vannsiden derimot vil gjøre det motsatte ved generelt sett å fjerne løsmasser fra bunn og sider i vannveien. Vesentlige aktører som påvirker dette bildet er nedbør, frost og tele, bølger samt menneskelig aktivitet. Geometri, grunnvann, vannføring og vegetasjon m.v. bestemmes gjennom et samvirke av alle disse faktorene.

I en situasjon når disse faktorer virker på en ugunstig måte vil den naturlige erosjonsskråningen ha sikkerhet meget nær 1,0 mot utrasing, og ved spesielt ugunstige forhold vil det skje utrasinger (sikkerhet mindre enn 1,0). Siden istiden for 10 000 år siden har slike kombinasjoner av uheldige omstendigheter vært mulig flere ganger. Blant de utraste og nydannede skråninger finnes det mange skråninger som enda ikke er rast ut under slike uheldige kombinasjoner.

Når det ved et reguleringstiltak blir påvirkning av en eller flere av disse faktorene i ugunstig retning, så kan det ikke forventes at man skal få se de uheldige resultatene med en gang. Dette forutsetter at de øvrige faktorer vil inntreffe samtidig på en ugunstig måte. Dersom den ugunstige påvirkningen av reguleringstiltaket er stor, vil det kunne resultere i negative utslag med det samme; hvis den er liten først etter mange år. Hva som er lite eller stort er betinget av lokale forhold og i tillegg av løsmassetypen i skråningen. Det må derfor tas forbehold om at ras kan komme til å inntreffe i fremtiden uten at man ytterligere endrer de hydrologiske forhold, kanskje særlig i skråninger i marine leirer.

Erosjonsprosessen som reguleringen griper inn i, har et geologisk tidsperspektiv, dvs hundreder av år. Reguleringer har imidlertid et teknisk/økonomisk perspektiv på 30-50 år, mens effektreguleringen har ukes eller døgnperspektiv. Virkningen av alle disse tre (naturlig erosjon, regulering, effektregulering) bedømmes i et menneskelig perspektiv. Det betyr at i de tilfeller hvor verken reguleringen eller effektreguleringen er den direkte årsak til en utrasing eller erosjon rent lokalt, men at dette er et resultat av den geomorfologiske prosess, så er det nesten umulig å bevise dette. Forholdene før regulering og etter regulering (dersom det er gått mer enn ca. 10 år) tas som regel for konstante med mindre det er foretatt en grundig kartlegging på forhånd. Ved kartlegging av virkningen av effektregulering bør det tas hensyn til dette, mens avgjørelsen om effektregulering eller ikke bør ta høyde for at effektreguleringen vil bli gitt ansvaret for å være utløsende årsak i alle tilfeller.

Følgene av vassdragsreguleringer kan grovt sett deles i to grupper:
- Erosjon som følge av økt eroderende evne i vannmassen.
- Utrasing som følge av nedsatt stabilitet i løsmassene

Studier gjort bl.a. av Simons og Li (1982) viser at mens den naturlige erosjonen virket mer på hele tverrsnittet, begrenset virkningen av reguleringen seg til den øvre delen av tverrsnittet i form av avtrapping av elveskråningen og utvidelse av tverrsnittet med mindre enn 3-5 m på hver side. Erfaring og studier viser at mer enn 90% av all erosjon skjer innenfor 10% av den tiden et vassdrag er utsatt for flom, spesielt store flommer. Flommens varighet synes imidlertid å være viktigere enn flomstørrelsen.

Erosjonen bestemmer skråningenes geometri som igjen bestemmer stabiliteten. Erosjonen skjer på grunn av de skjærkrefter som settes opp av vannstrømmen mot massen i tverrsnittet. Maksimal belastning/erosjon vil opptre omtrent ved 2/3 vanndybde (Simons and Li, 1998). Dette er som regel dypere enn det området i skråningstverrsnittet hvor de fleste av de øvrige prosessene virker.

Ustabilitet langs elvesider og magasiner i form av sig, skalkinger og ras kan skyldes både erosjon og andre endrede stabilitetsforhold. For vurdering av effektreguleringens virkning (raske vannstandsendringer) er det spesielt viktig å se på tilleggsvirkningene utover det som opptrer naturlig eller under vanlig drift.

De faktorene som i hovedsak vil påvirkes av effektreguleringen er:

På vannsiden:
- vannstand og vannstandsvariasjoner
- vannhastighet
- bølger
- is

På landsiden:
- grunnvann og gradient
- markfuktighet
- frost, tele, is
- vegetasjon

Ser vi på tradisjonell vurdering av stabilitet og erosjon finner vi at stabiliteten i hovedsak påvirkes av

- vannstand og vannstandsvariasjoner
- grunnvann og gradient

mens samtlige faktorer påvirker erosjonen. Tradisjonell stabilitetsanalyse benyttet på lave erosjonsskråninger gir som resultat at skråningen er ustabil selvom denne har stått i flere år. Det er derfor behov for å se nærmere på hvordan en del av de øvrige faktorer påvirker stabiliteten.

3.2. *Stabilitetsanalyse*

Generelt er sikkerheten mot utglidning gitt av forholdet mellom skjærspenning og skjærfasthet. Skjærfastheten er igjen en funksjon av den indre friksjon mellom mineralkornene og kohesjonen (attraksjonen) i massen. Ved fastleggelse av skjærfastheten er det vesentlig forskjell på friksjonsandelen og kohesjonsandelen. Friksjonsandelen er hovedsakelig bestemt ut fra de effektive spenningene i løsmassen som er gitt av differansen mellom totale spenninger og poretrykk siden selve friksjonen (tan φ) varierer lite for de angjeldende løsmassene. Kohesjonen er bestemt ut fra løsmassetype og dannelseshistorien med bl.a. tidligere forbelastning. Det er videre gitt at for lave skråninger er kohesjonsandelen relativt sett viktigere enn for høye skråninger. Leirer kan kalles kohesjonsjordart, og de kan stå vertikalt på inntil 3-4 m høyde i kort tid (opptil noen døgn). Grov sand kalles friksjonsjordart og vil innstille seg på sin naturlige rasvinkel under tørre forhold og stort sett uavhengig av skråningshøyden. Hvis grunnvann bryter ut på overflaten av sandskråningen reduserers rasvinkelen til det halve. Mellom disse ytterpunktene vil mesteparten av de aktuelle løsmassetypene befinne seg.

Når sikkerheten mot utglidning skal vurderes er det stor forskjell på høye og lave naturlige skråninger. Skillet mellom høy og lav vil være i området 2-4 m. For høye skråninger kan tradisjonelle stabilitetsanalyser gi tilfredsstillende resultat, mens for lave skråninger kan tradisjonelle stabilitetsanalyser kun gi en pekepinn om forholdene. Hovedforskjellene mellom høye og lave naturlige skråninger ligger både i graden av påvirkning av andre faktorer enn de som normalt inngår i stabilitetsanalysen og konsekvensene av unøyaktigheter i de parametre som inngår i analysen. Når det gjelder parameterbestemmelser, blir fastsettelse av friksjon og kohesjon (attraksjon) vanskeligere jo lavere spenningsnivået er. Friksjon og kohesjon er ikke konstante verdier for en jordart, men endrer seg med spenningsnivået særlig ved lave spenninger. For høyere spenninger kan derimot friksjon og kohesjon være konstante for store spenningsområder. Videre vil unøyaktigheter som skyldes forstyrrelse i jordprøvene spille en større rolle. Grunnvannstand kan vanligvis måles med centimeters nøyaktighet, men må den anslås eller beregnes er nøyaktigheten i størrelsesorden 0,5 m. Det effektive spenningsnivå kan fastsettes med 5-20 kPa som usikkerhet og tilsvarende for kohesjonen. For lave skråninger (lavere enn 4m) hvor totalspenningene vil variere fra 0 til 80 kPa er dette betydelige størrelser.

Tradisjonell stabilitetsanalyse omfatter m.a.o skjærfasthetsparametre og effektivspenninger (total spenning minus porevannstrykk).

Når det gjelder andre faktorer som er avgjørende for lave skråninger, så vil vegetasjon og markfuktighet komme i første rekke. Vegetasjonen vil virke som en armering og vil gi et positivt bidrag til skjærmotstanden langs en potensiell glideflate. Virkningen vil ikke bare gjelde mot skråningsoverflaten, men ned til underkant av rotsystemet. Trær og busker er viktig i så måte, og virkningen kan lokalt nå til flere meters dybde. Markfuktighet omfatter kapillært vann, sigevann og adsorptivt vann. Innvirkningen av markfuktigheten er betydelig og vil sammen med vegetasjonen være bestemmende for geometrien av de lave skråningene. Når så markfuktigheten er avgjørende for vegetasjonen, og nedbøren er avgjørende både for markfuktigheten og grunnvannstanden, blir det klart at en stabilitetsanalyse av lave, naturlige skråninger må inneholde tre hovedelementer:

- tradisjonell stabilitetsanalyse
- andre faktorers innvirkning på skråningsstabiliteten
- erosjonsvurdering.

3.3. *Andre faktorers innvirkning på skråningsstabiliteten*

Ser vi bort fra endringer i geometri p.g.a. erosjon, vil faktorene av størst betydning være:

- menneskelig aktivitet
- markfuktighet
- vegetasjon
- frost og solifluksjon
- sprekker

3.3.1. *Menneskelig aktivitet*

Menneskelig aktivitet som kan påvirke stabiliteten er:

- jordbruk
- bygge- og anleggsvirksomhet
- uttak av grus i elveløpet
- bruk av grunnvann
- miljøendringer
- reguleringer

Menneskelig aktivitet er enkelt å fastlegge og eventuelt å kontrollere, og nødvendige retningslinjer for bruk av og ferdsel i terrenget inntil en vannvei kan utferdiges. De øvrige faktorer er betinget av naturen selv og kan vanligvis ikke kontrolleres.

3.3.2. *Markfuktighet*

Markfuktigheten er avgjørende både for vegetasjon og frost. Markfuktigheten består av adsorptivt vann, sigevann og kapillært vann. Adsorptivt vann er bundet til overflaten av mineralkornene og påvirkes ikke av effektreguleringen. Sigevannet er vann i bevegelse fra terrengoverflaten til grunnvann. Dette påvirkes heller ikke av effektreguleringen. Det kapillære vannet er imidlertid direkte berørt av vannstandsvariasjonene.

Porene i en jordart er sammenhengende, men med varierende tverrsnitt. Imidlertid vil en jordart ha en midlere og en maksimal porediameter avhengig av jordartens korngradering. I kapillærrør som kan fuktes vil et fritt vannspeil bli trukket oppover bestemt av overflatespenningen og diameteren på røret. Porene i en jordart virker som kapillærrør, men siden en jordart aldri er helt homogen og porene aldri jevnstore, vil opptrekkingen av kapillært vann variere mye innen en jordart og især innen et løsmasseprofil. Opp til et visst nivå vil jordarten være mettet med kapillært vann (nedre kapillære grense), mens videre oppover vil gradvis færre porer være fyllt. På et punkt vil den øvre kapillære grense nås. Mellom de kapillære grensene vil vi ha en umettet jordart. I grovsand er den kapillære stigehøyden av størrelsesorden cm, i silt m og i leire flere 10-talls meter.

Dersom en mettet jordart dreneres, vil kapillært vann henge igjen, men denne gang vil både øvre og nedre kapillære grense være høyere enn om en lot det kapillære vannet stige i en tørr jordart. En jordart har m.a.o. ikke et entydig definerbart kapillært potensial noe som gjør det vanskelig å lage beregningsmodeller som inkluderer kapillært vanntrykk.

Belastningen fra det kapillære vannet overføres til kornskjellettet. Den vil være null ved grunnvannstanden og maksimal ved øvre kapillære grense lik vekten av vannsøylen. Belastningen representerer et sug som overføres som et negativt poretrykk som igjen øker effektivspenningene. En sand vil f.eks. føles fast der fuktigheten begynner og løs der vannstanden er. Det kapillære suget er en vesentlig bidragsyter til at lave erosjonskråninger står langt brattere enn jordartens naturlige rasvinkel skulle tilsi, og at høye erosjonsskråninger har et brattheng mot toppen. Det negative poretrykket er av størrelsesorden 10 kPa for en middels sand og 30-50 kPa for en silt. Dette tilsvarer vekten av henholdsvis 0,5 m sand og 1.5- 3 m silt

Endringer i det negative poretrykket kan skje både momentant og med tiden. Momentan endring fås når trykkforholdene endres i den vannmettede sonen i jordmassen. Tidsavhengig endring fås når det kreves vann tilført til eller drenert fra den kapillære sonen. Endringer i grunnvannstanden vil gi begge typer trykkendring. For eksempel vil en heving av vannstanden umiddelbart redusere det negative poretrykket tilsvarende i hele den kapillære stigehøyden. Ca. 1 m heving av vannstanden ved rask effektregulering vil nøytralisere virkningen av kapillariteten i sand. Dersom den hevede grunnvannstanden holdes over noe tid vil den kapillære grensen heves tilsvarende ved tilførsel av sigevann og oppsugd grunnvann.

Endringer av det kapillære nivået er tidsavhengig og vil følge etter endringene i grunnvannstanden. Ved rask effektregulering (døgnvariasjon eller oftere) vil ikke den kapillære likevekten vanligvis innstille seg fort nok. Tendensen er at grunnvannstanden innstiller seg opp mot øvre reguleringsnivå.

Skjærfastheten i en mellomjordart (silt/sand) kan skrives som

$$\tau = c' + (\sigma - S_r \cdot u_w) \tan \varphi' \qquad \text{(I)}$$

hvor τ = skjærfasthet
c' = effektiv kohesjon
σ = totalspenning (effektivspenning + poretrykk)
S_r = grad av vannmetning (mellom 0 og 1)
u_w = porevannstrykk
φ' = effektiv friksjonsvinkel

eller

$$\tau = c' + C_a + \sigma \tan \varphi' \qquad \text{(II)}$$

hvor $C_a = -S_r u_w \tan\varphi'$

Siden både S_r og u_w er meget vanskelig å bestemme har det utviklet seg flere måter å anslå fastheten til en umettet silt på:

- økt kohesjon/totalspenningsanalyse
- vurdering/måling av S_r og u_w
- friksjonstillegg

Den økte kohesjonen anslås ofte ut fra en vannmetning på 50%, friksjon lik 0,6-0,7 og kapillært trykk på 2-3 m som gir et tillegg på ca. 10 kPa (varierer fra 5 til 15 kPa). Laboratorieforsøk på mettede mellomjordarter gir normalt en lav verdi for kohesjonen (5-15 kPa). Samlet kan kohesjonen for en umettet mellomjordart komme opp i 20-30 kPa.

Dette tilsvarer udrenert skjærfasthet for bløt leire, og stabilitetsvurderinger i form av totalspenningsanalyser blir benyttet.

Statens geotekniske institutt i Sverige (SGI Informasjon 16, 1998) påpeker flere empiriske sammenhenger i tillegg til målinger i felt og laboratorium for å få frem verdier for S_r og u_w. Disse verdiene benyttes så for massene over grunnvannstanden i tradisjonelle stabilitetsanalyser.

Uttrykket (I) foran kan skrives som:

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi' - u_w \tan \varphi_b \qquad \text{(III)}$$

hvor $\tan \varphi_b = S_r \tan \varphi'$. Siden u_w er negativt gir dette et friksjonstillegg i umettede masser og brukes f.eks. i regneprogrammet SLOPE hvor φ_b anbefales benyttet med verdier 15-20°. u_w måles i forhold til beregnet grunnvannstand som bestemmes v.h.a. programmet SEEP. Anbefalt φ_b-verdi tilsvarer S_r ca. 50% og er anslått til å gi konservative resultater.

Det kan konkluderes med at det ikke finnes en generelt akseptert beregningsmetode som ivaretar den kapillære virkningen i umettede jordmasser, men at det finnes flere måter å beregne virkningen på. Disse resultatene er beheftet med usikkerhet og må analyseres nøye.

3.3.3. Vegetasjon

Plantenes røtter utnytter både sigevann og kapillært vann og til en vis grad også adsorptivt vann. Plantene og røttene danner tilsammen et armert nettverk med ikke ubetydelig strekkstyrke som vil gi et tillegg til skjærmotstanden langs en potensiell glideflate. Imidlertid er vegetasjonen avhengig av vanntilgangen og vil forandre seg med endringer i denne. Både uttørking og vannmetting fra en regulering kan ødelegge bindingsevnen til vegetasjonen og forårsake glidninger og økt sig.

Spesielt for lave skråninger vil geometrien med overheng være direkte avhengig av vegetasjonen. Store overheng forårsaket av trær, spesielt gran med et utstrakt rotnett, kan virke som en tilleggsbelastning på skråninger, jo større dess mer trærne heller ut mot vannveien. Det er ikke uvanlig at slik tilleggsbelastning utløser et større ras eller skalking enn om trærne var blitt hugget.

Vegetasjonen utgjør også et godt erosjonsdekke. Der hvor dekket fjernes vil erosjonsutsatte masser bli eksponert. Effektreguleringen vil bidra til undervasking av vegetasjonsdekket og økning i overhengene og kan med tiden bli årsak til utrasing og sig.

Bidraget fra vegetasjonsdekkets strekkstyrke er lite kartlagt. Internasjonal forskning antyder imidlertid at strekkstyrken kan være i størrelsesorden 20 kPa ved 0,1 m dyp og ca. 1 kPa ved 1-2 m dyp. (Wu, Ristenberg & Flege, 1994; Gray, 1994). Hvorvidt dette er representativt for norske forhold er ukjent.

For svært bratte skråninger, især skråninger som brattes opp mot terrengoverflaten og som viser overheng, bør virkningen av en horisontal kraft på ca. 20 kPa som gir positiv støtte ca. 0,2 m under terreng tas med i stabilitetsvurderingene (Wu, Ristenberg & Flege, 1994; Gray, 1994).

Ødeleggelse/fjerning av vegetasjon må tillegges stor vekt dersom virkningen av vegetasjon tas med i analysen. Videre påpekes at dersom vegetasjonens strekkstyrke overskrides vil dette som regel resultere i et sprøtt (hurtig) brudd i løsmassene.

3.3.4. Frost og solifluksjon

Ved vurdering av skråningsstabiliteten er ras under teleløsningen viktig. Muligheten for dannelse av tele vil endres ved endring og især ved heving av grunnvannstanden. Telemekanismen henger nøye sammen med hvilket trykk man har i porevannet umiddelbart under de underste iskrystaller. Er undertrykket i porevannet betydelig, vil iskrystallene ha vanskelig for å vokse, og de teleskader som oppstår vil være relativt små, selv i en telefarlig masse. Selv en forholdsvis liten endring av porevannstrykket i en jordart kan derfor bevirke meget store utslag i televirkningen. Dette vil kunne skje over relativt store avstander fra vassdrag, og i relativt store høyder over vannflatens nivå. Det er ikke slik at en ved hevning av et vannspeil i en elv eller vann bare vil flytte et telebelte noe oppover de tilliggende skråninger. Man vil ha en innvirkning over hele skråningens høyde såfremt jordarten i skråningen er det vi kaller telefarlig, hvilket stort sett vil si at den inneholder så meget silt og leire at den kapillære stigehøyde er av betydning.

Telefarlige masser kan få utviklet islag på flere cm's tykkelse som ved smelting om våren vil bidra til at vanninnholdet i massen langt overstiger det massen kan ta i porevolumet. Ofte henger da skråningen i torven, og når dette festet ryker oppstår de vanlige grunne teleutglidningene.

Solifluksjon er en langsom plastisk flytning av massen i en skråning på grunn av temperatur og frost. Frost og telelinsedannelse vil presse overliggende masse utover vinkelrett fra skråningen. Under tining vil så tyngdekraften trekke massen vertikalt nedover. Vannmetting øker bevegelsen nedover. Større partikler (steiner) påvirkes mer enn mindre. Resultatet er ofte sprekker langs toppen av skråningen og valkdannelser i skråningen. Videre bidrar dette til å skjevstille gjerder, stolper og trær i skråningen. Prosessen vil over tid og under ugunstige forhold som ved høy nedbør eller stor snesmelting kunne resultere i grunne utglidninger.

Det kan være vanskelig å skille hva som skyldes erosjon/undergraving og solifluksjon i erosjonsskråninger.

Det finnes ikke regnemodeller for skråningsstabilitet som ivaretar virkningene av frost og solifluksjon. Faren for og eventuelle virkninger må bedømmes ut fra en grundig kartlegging av forholdene lokalt samt erfaring fra stedet eller liknende forhold.

3.3.5. Sprekker

Det er ikke uvanlig med sprekker nær terrengoverflaten. Oppsprekking kan skyldes uttørking, ødelagt vegetasjonsdekke, sig og deformasjoner. Vanligvis knytter oppsprekkingen seg til leire eller leirige masser. I friksjonsmasser vil sprekkene lukke seg naturlig.

Sprekker bidrar negativt til skråningsstabiliteten på to måter. Det blir ikke ydet skjærmotstand langs sprekkeflatene, og sprekkene kan bli vannfyllt (nedbør/smelting). En vannfyllt sprekk vil redusere stabiliteten med et utskyvende horisontalt vanntrykk.

Der sprekker påvises kan begge nevnte forhold inkluderes i en tradisjonell stabilitets-analyse.

3.4. *Faktorer som kan påvirke erosjonsforholdene*

3.4.1. *Generelt*

For å kunne vurdere omfang og utvikling av erosjon som virker i løsmassene langs en elv eller rundt et vann, må man ta i betraktning alle de faktorer som kan tenkes å innvirke på erosjonen. Disse vil hovedsakelig være følgende:

På vannsiden:
- vannhastighet og profil
- naturlig erosjonshud
- vannstand og vannstandsvariasjoner
- sedimenttype
- bølger
- is
- mengde og størrelse på transporterte partikler
- menneskelig aktivitet

På landsiden:
- nedbør og overflatevann
- grunnvann og gradient
- markfuktighet (kapillært vann, sigevann og adsorptivt vann)
- løsmasseprofil og sedimenttyper
- frost, tele, is
- vegetasjon
- solifluksjon og naturlige bevegelser i skråninger
- menneskelig aktivitet

I tillegg kommer at faktorene påvirker hverandre og er delvis gjensidig avhengige. Faktorene er beskrevet i vedlegg A. Den korte beskrivelse av disse faktorene i vedlegg A viser at det er vanskelig å skille de fra hverandre, og at det blir en del gjentagelser for å få beskrevet virkningene. Av spesiell interesse i sammenheng med effektregulering er virkningen av grunnvann og gradient og dette er derfor omtalt spesielt i kapittel 3.4.2.

I en undersøkelse av Simons og Li (1982) satte de opp og vurderte de faktorer som påvirker erosjonen, som vist i Tabell 3-1. Deretter ble de antatt viktigste kvalitativt vurdert i forhold til skjærspenningen mot bunn kun forårsaket av vannstrømmen som vist i Tabell 3-2. Beregningsgangen i dette er beskrevet i rapportserien til FoU-prosjektet "Effektregulering - miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak" i rapport nr. 6 "Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak", NVE (1998). Her er effekten av kurvatur på elveløpet også omtalt. Denne er nok den viktigste enkeltfaktor og kan utgjøre et tillegg på opptil 100% for elvesvinger med en radius på 2-3 ganger elvebredden.

Tabell 3-2 viser at virkningen av de nevnte faktorer kan utgjøre et tillegg på nesten 50% til den erosjonsvirkningen vannstrømmen har. Det er forutsatt at faktorene er vurdert relativt til ett sted. Virkningene av vannveiens forløp og geometri samt bunntopografi er det sett bort fra.

ÅRSAKER TIL SKRÅNINGSEROSJON

I. Hydrauliske parametre
- A. Vann
  - 1. Tyngdetetthet
  - 2. Temperatur/viskositet
- B. Strømning
  - 1. Vannføring: størrelse, varighet og frekvens
  - 2. Gjennomsnittshastighet
  - 3. Hastighetsfordeling
  - 4. Turbulens
  - 5. Skjærkraft
  - 6. Strømningskraft
  - 7. Oppløft
  - 8. Moment

II. Løsmasseparametre
- A. Bunnmateriale
  - 1. Størrelse
  - 2. Gradering
  - 3. Form
  - 4. Tyngdetetthet
- B. Skråningsmateriale
  - 1. Størrelse
  - 2. Gradering
  - 3. Form
  - 4. Tyngdetetthet
  - 5. Kohesjon
  - 6. Friksjonsvinkel
  - 7. Permeabilitet
  - 8. Porøsitet
  - 9. Strekkstyrke

III. Karakteristika for skråningen
- A. Oppbygging
  - 1. Friksjonsmasser
  - 2. Kohesjonsmasser
  - 3. Lagdeling
  - 4. Fjell
- B. Geometri
  - 1. Høyde
  - 2. Helning

IV. Vindbølger
- A. Bølgekrefter
- B. Grunnvannssig

V. Klimatiske faktorer
- A. Frysing
  - 1. Istykkelse
  - 2. Varighet
  - 3. Frekvens og varighet
- B. Tining
- C. Permafrost

VI. Biologiske faktorer
- A. Vegetasjon
  - 1. Trær
  - 2. Busker
  - 3. Gress
- B. Fauna

VII. Menneskelig aktivitet
- A. Regulering (effektregulering)
- B. Båtbølger
- C. Jordbruk
- D. Gruvedrift
- E. Transport
- F. Urbanisering
- G. Drenering
- H. Deltautvikling
- I. Bruk av fritidsbåter

Tabell 3-1 . Simons and Li, 1982.

Tillegg i skjærspenning relativt til hovedspenning på naturlige skråninger,τ (friksjonsmasser)		
Årsak til skråningserosjon	Lave,naturlige skråninger	Høye, naturlige skråninger
Flomvariasjon	0.02 τ	0.02 τ
Variasjon i regulering	0.07	0.10
Vannstandsvariasjon	0.07	0.11
Vindbølger	0.02	0.01
Båtbølger	0.05	0.05
Frysing-tining	0.01	0.01
Is	0.02	0.04
Grunnvannsig	0.05	0.07
Tyngdekrefter	0.05	0.11
Sum	0.36 τ	0.52 τ

Tabell 3-2. Eksempel på tillegg i skjærspenning, Simons and Li (1982).

3.4.2. Betydning av grunnvann og gradient for erosjon

Virkninger av erosjon kan medtas i stabilitetsberegningene i den grad den gir endringer i geometri og grunnvannstand.

Der det er fare for grunnvannserosjon, f.eks. der grunnvannstanden bryter ut i en skråning uten at geometri eller grunnvannstand er endret, kan faren for erosjon/utglidninger i overflaten allikevel anslås for eksponerte friksjonsjordarter.

Selv om kohesjon angis ved skjærfasthetsbestemmelse av friksjonsjordarter for et spenningsområde, er kohesjonen lik null når spenningsnivået er lik null som i terrengoverflaten. Motstanden mot utrasning/erosjon kan da bedømmes som for en uendelig lang skråning avhengig av skråningshelning, gradient og retning på grunnvannstrømmen. Dette betyr at skråninger av kohesive masser som står brattere enn friksjonsvinkelen er "ustabile" i overflaten. Denne "ustabiliteten" fører på lang sikt til stadige mindre utrasninger i overflaten.

Dersom friksjonsmotstanden er tan φ, skråningshelningen tan α, er sikkerheten for massene i overflaten på skråningen uttrykt ved (Aarhaug, 1984):

$$F = \tan\varphi / \tan\alpha \quad \text{(ikke vannstrøm)} \qquad (1)$$

og

$$F = \gamma' \tan\varphi / \gamma \tan\alpha \approx \tan\varphi / 2\tan\alpha$$

(med vannstrøm parallelt overflaten) (2)

og

$$F = \tan\varphi / \tan(\alpha+\omega) \quad \text{(med vannstrøm med gitt vinkel og gradient)} \qquad (3)$$

Effekten av retning på grunnvannstrøm og gradient kan beregnes og gis for formel (3) som et tilsynelatende tillegg (ω) til skråningsvinkelen α.

Siden det er sett vekk fra kohesjon i overflaten vil sikkerhetsfaktoren beregnet av (1) ofte være mindre enn 1 for skråninger med kohesive masser. Dette forteller at overflaten ikke er stabil på lang sikt. Det interessante er imidlertid den relative reduksjon man får i sikkerhet gitt av: (2)/(1) eller (3)/(1).

Tørre friksjonsmasser vil stå stabilt ved helninger slakere enn 1:1,3 - 1:1,5, mens den samme massen med vannstrøm parallelt med overflaten må ha en skråning slakere enn 1:2,5 - 1:4 for å være stabil. I tilfeller der grunnvannstrømmen kommer ut av skråningen er faren for utrasing /erosjon ennå større. Mest ugunstig er situasjonen når grunnvannstrømmen er rettet oppover med en vinkel på 0 - 25 °.

3.5. Rammebetingelser for grunnvannsmodellering og stabilitetsanalyse

Effektregulering vil gripe inn i allerede pågående komplekse erosjonsprosesser med negativ påvirkning. De negative følgene kan generelt deles i to:

- erosjon som følge av økt eroderende evne i vannmassene
- utrasing som følge av nedsatt stabilitet i løsmassene

Ved en sammenlikning av de negative følgene vil de generelt sett fremstå som like omfattende, eventuelt at økt erosjon er den største.

Før effektregulering igangsettes, må det foretas kartlegging av den berørte delen av vassdraget for å bestemme:

- profil
- løsmasser
- vannstander og naturlige vannstandsvariasjoner
- vannhastighet
- bølger
- grunnvann
- markfuktighet
- vegetasjon
- menneskelig aktivitet

slik at en forhåndsvurdering av de forskjellige virkningene kan foretas.

For å gjøre tradisjonell stabilitetsanalyse mer anvendelig for lave erosjonsskråninger ut mot strømmende vann må det tas hensyn til:

- variasjoner i vannstand og grunnvannstand
- sug fra kapillaritet
- strekkrefter fra vegetasjon
- "belastning" fra utstrømmende grunnvann

En slik utvidet stabilitetsanalyse må kontrolleres med målinger i marken over tid for å foreta nødvendige tilpasninger og eventuelle forenklinger ut fra samlet erfaring.

Dersom en utvidet stabilitetsanalyse gir høy sikkerhet, gir dette kun en pekepinn på forholdene. Det bør allikevel avklares om området kan bli utsatt for erosjonsskade eller nedsatt stabilitet. Dersom en utvidet stabilitetsanalyse gir lav sikkerhet, bør det antas at skade kan oppstå, og konsekvensene ved skade og utbedringstiltak bør utredes.

4. GRUNNVANNSMODELLERING

4.1. Innledning

Målet med simuleringen av vannstrømmen i mettet og umettet sone har vært å estimere inngangsparametere for stabiltetsberegninger. Dette er gjort for to skråninger inntil en elv eller et magasin for å vurdere de kritiske faktorene for grunnvannserosjon eller utglidninger i skråningene.

Det er forsøkt å forenkle de naturlige forhold ved å se på kun to forskjellige skråningshøyder. Profilene er erfaringsmessig de mest aktuelle for norske forhold. Det er kjørt 14 forskjellige simuleringer for å vurdere følsomheten av fem forskjellige parametere i modellene:

1) Kornfordeling/hydraulisk ledningsevne
2) Skråningens høyde
3) Vannstandsendring p.g.a. effektregulering
4) Initialvannstand i elv/magasin
5) Grunnvannstand

4.2. *Hydrogeologisk modell*

Skråningene som er modellert er ikke konkrete tilfeller, men har tatt utgangspunkt i feltdata fra NVE. Disse dataene er hentet fra feltet "Musgjerdet" inntil elven Driva i Sunndal (NVE, 1968), feltdata fra forskningsfeltet Moreppen ved Gardermoen (Pedersen, 1994) som viser lignende geologiske forhold og feltet ved innløpet til Øyeren i Akershus. Feltet Musgjerdet består av en 2 m høy skråning med middels grove masser. Feltet ved Øyeren består av en 4 m høy skråning med finere masser som har pågående erosjon, se Figur 2-1. Ved Øyeren har det over kortere perioder vert regulert på ukebasis tilsvarende det vist i Figur 4-4.

Massene i skråningene er karakterisert ved hydraulisk ledningsevne (K), friksjonsvinkel (φ), kohesjon (c) og kapillaritet (φ_b), se Figur 4-1.

Som utgangsmodell for simuleringene er data fra feltet "Musgjerdet" benyttet. Simuleringen av denne utgangsmodellen blir sammenlignet med etterfølgende simuleringer. Dette gjør at en sammenligning mellom de forskjellige simuleringene får frem betydningen av de enkelte parametre for grunnvannstrømning og stabilitet i skråningene. Det er utført 14 forskjellige simuleringer ved at en av utgangsparametrene i modellen endres for hver simulering. Simuleringene viser derved hvilke parametere som gir kritisk utslag i stabilitetsberegningene. Når det gjelder variasjonen i parametrene "skråningshøyde" og "massetype" er disse hentet fra feltet Øyeren.

"Hydraulisk ledningsevne" (benevning K, enhet m/s) er et hydrogeologisk faguttrykk som samsvarer parameteren "permeabilitetskoeffisient" (benevning k, enheten m/s) innenfor geoteknikk. Hydraulisk ledningsevne kan beskrives slik:

$$K = \frac{-Q}{A\left(dh/dL\right)}$$

der:
Q = vannføring eller flux (m^3/s)
A = strømningsareal (m^2)
$\left(dh/dL\right) = i$ = grunnvannsgradient (m/m)

Den hydrauliske ledningsevnen (K) bestemmes først og fremst av massens kornfordeling. K er stor for grove ensgraderte masser, og liten for fine velgraderte masser. Massenes kornfordeling kan karakteriseres vha. median kornstørrelse (d_{50}) og sorteringsgraden (S_0), også kalt gradering.

Median kornstørrelse er den korndiameter som 50% av massen etter vekt er finere enn. Sorteringsgraden (S_0) kan beregnes slik:

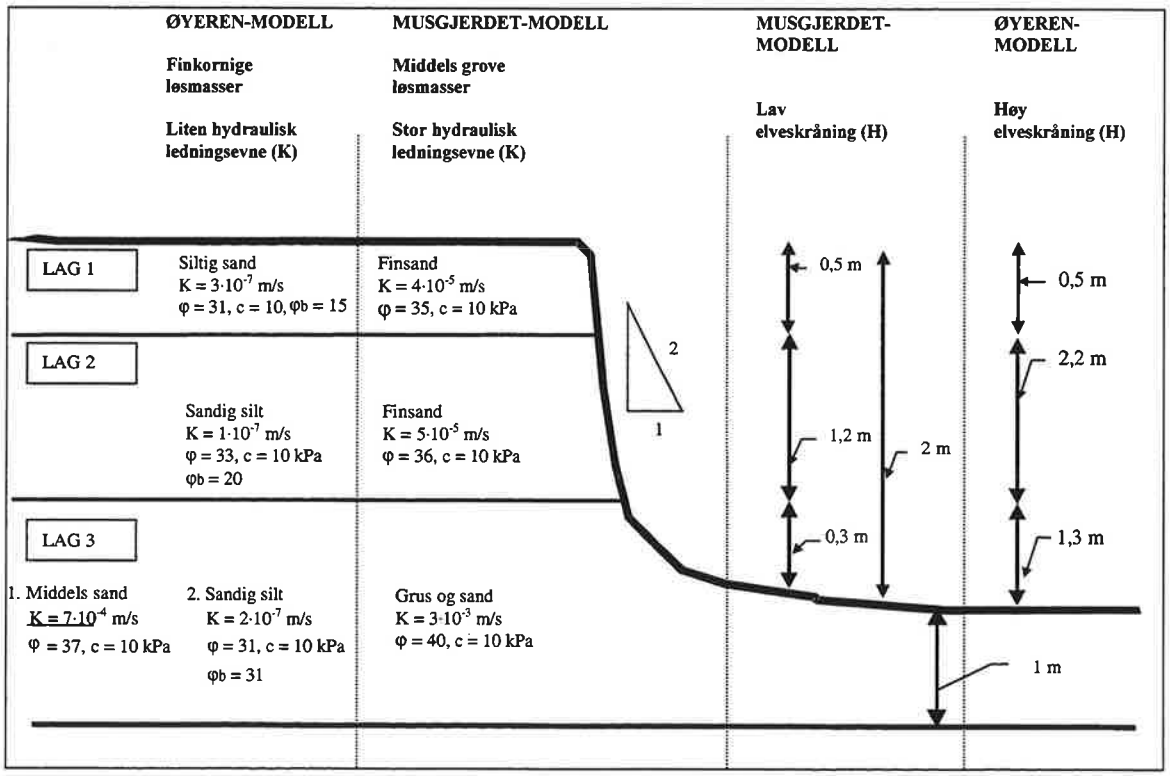
$S_0 = \log d_{75}/d_{25}$

Der d_{75} og d_{25} er den korndiameter som henholdsvis 75% og 25 % av massen etter vekt er finere enn. En lav verdi angir dermed ensgraderte masser og en høy verdi velgraderte masser (dårlig sortering).

Tabell 4-1viser d_{50} og S_0 for massene som er benyttet i modellene. Kornfordelingen til løsmassene er ikke lagt inn i simuleringsprogrammene for grunnvannstrømnings- og stabilitetsberegningene. Verdiene som skal representere løsmassene i simuleringene er gitt i Figur 4-1.

	Musgjerdet	**Øyeren**
Lag 1	d_{50} (mm) = 0,12 Sortering ca. 0,3	d_{50} (mm) = 0,12 Sortering ca. 0,23
Lag 2	d_{50} (mm) = 0,12 Sortering ca. 0,35	d_{50} (mm) = 0,017 Sortering ca. 0,92
Lag 3	d_{50} (mm) = 7,0 Sortering ca. 0,88	d_{50} (mm) = 0,029 Sortering ca. 0,85

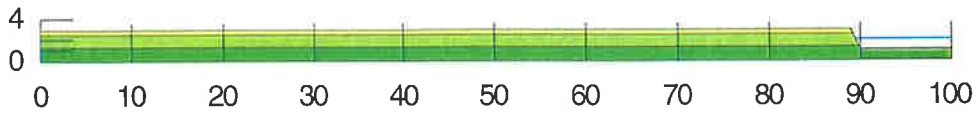
Tabell 4-1. Data for massene benyttet i modellen.



Figur 4-1. Geologisk modell av skråningene.

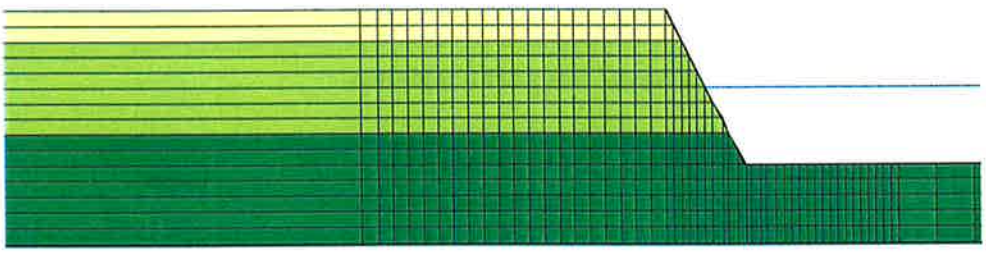
Modellen (Figur 4-1) viser en skråning med skråningshelning 2:1. Stratigrafien i skråningen omfatter 3 lag, der det nederste laget også utgjør bunnen av modellen. Høyden på skråningen er satt til enten 2 meter (Musegjerdet-modellen) eller 4 meter (Øyeren-modellen).

Oppbyggingen av modellen består av 3 horisontale lag langs et 100 m langt profil. Figur 4-2 viser modellen med 2 meter høy skråning. Bunn ligger 1 meter over datum.



Figur 4-2. Modell med 2 meter høy skråning

Gridet til modellen har en økt oppløsning ved det mest kritiske området, dvs. i selve skråningen, på ca. 10 x 20 cm. Omlag 5 m fra skråningen er gridoppløsningen ca. 20 x 500 cm, se Figur 4-3.



Figur 4-3. Oppbygging av modell, gridoppløsning; lik x og y målestokk.

4.3. Simuleringer av poretrykk i umettet- og mettet sone

Programmet "SEEP/W" fra GEO-SLOPE International, Canada er benyttet i beregningen av transient og stasjonært poretrykk langs et profil. Programmet anvender "Finite Element Metod- FEM" for å beregne væskestrømning i umettet og mettet sone. Programmet kan simulere positivt og negativt poretrykk i skråninger der grunnvannspeilet også kan krysse en skråning og danne en utstrømningshorisont (seepage face). Akkurat dette scenarioet er en del av den tenkte hydrogeologiske modellen ved en hurtig endring av vannstanden i elven eller magasinet. For hele modellen er det lagt inn forskjellige funksjoner for å beskrive permeabilitet av både mettet og umettet sone. Funksjonene omfatter hydraulisk ledningsevne mot poretrykket (±) og mot vanninnholdet i porene.

Forutsetningene for simuleringene har vært at disse utføres i 2-D og begrenses til 14 kjøringer. Simuleringene har heller ikke sett på andre naturlige prosesser som vil kunne påvirke erosjon/utglidninger i skråninger (f. eks. erosjon p.g.a. elvevannføring).

11 av 14 simuleringer er kjørt med fluktuerende vannstand (transient beregning). Dette betyr at grunnvannstanden i skråningen har variert med tid. Behovet for simulering av umettet

sone har også vært nødvendig for å fange opp den betydningen markfuktighet har for skråningsstabilitet.

Følgende grensebetingelser er benyttet i simuleringene; konstant vannstand ved "dalsiden", varierende vannstand i elv/magasin (gitt funksjon), "ingen strømning" i bunnen av profilet og "ingen strømning" ut av høyere modellside. På overflaten er det lagt inn infiltrasjon av nedbør. Infiltrasjonen er satt til 1 mm/dag for middels grove løsmasser og 0,1 mm/år for fine masser. Nedbørsinfiltrasjon er tatt med i modellen for bedre å simulere fuktigheten i umettet sone. For alle de transiente simuleringene er resultatene fra en beregnet stasjonær tilstand benyttet som initialtilstand. Dette er gjort for å ivareta virkningen av nedbørsinfiltrasjon.

Verdiene som er valgt for de forskjellige parametere er stort sett hentet fra felterfaringer, data fra NVE om feltet "Musgjerdet" i Sunndal (NVE, 1968) og Øyeren i Akershus, samt feltdata fra forskningsfeltet Moreppen, Gardermoen (Pedersen, 1994). De forskjellige verdiene for hver av de fem parametrene er som følger:

1. Hydraulisk ledningsevne (K)

   a. Finkornige løsmasser / liten hydraulisk ledningsevne (Øyeren-modell)
   Lag 1; $K = 3 \cdot 10^{-7}$ m/s
   Lag 2; $K = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s
   Lag 3; $K = 2 \cdot 10^{-7}$ m/s

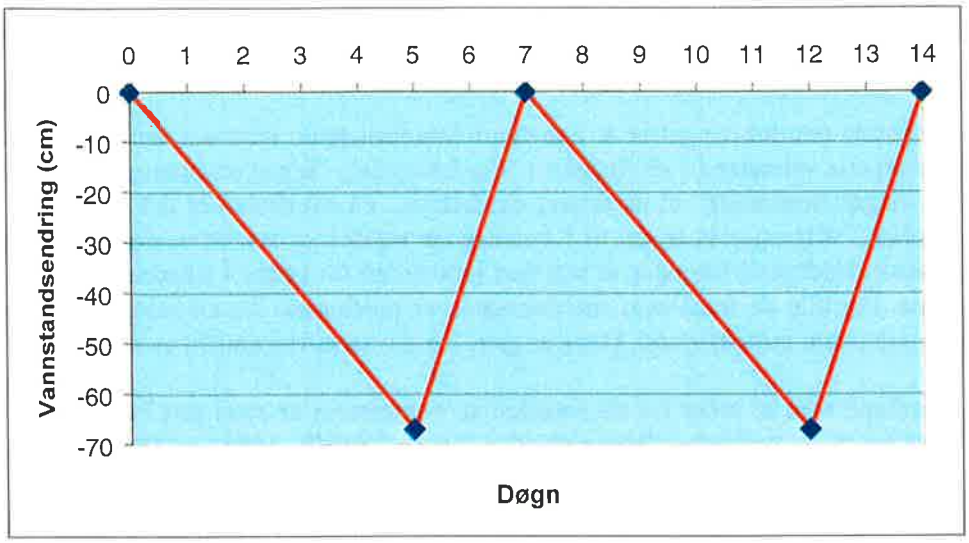
   a*. Finkornige løsmasser / liten hydraulisk ledningsevne med høy K-verdi i lag 3 (Øyeren-modell)
   Lag 1; $K = 3 \cdot 10^{-7}$ m/s
   Lag 2; $K = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s
   Lag 3; $K = 7 \cdot 10^{-4}$ m/s

   b. Middels grove løsmasser / stor hydraulisk ledningsevne (Musgjerdet-modell)
   Lag 1; $K = 4 \cdot 10^{-5}$ m/s
   Lag 2; $K = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s
   Lag 3; $K = 3 \cdot 10^{-3}$ m/s

2. Skråningens høyde (H)

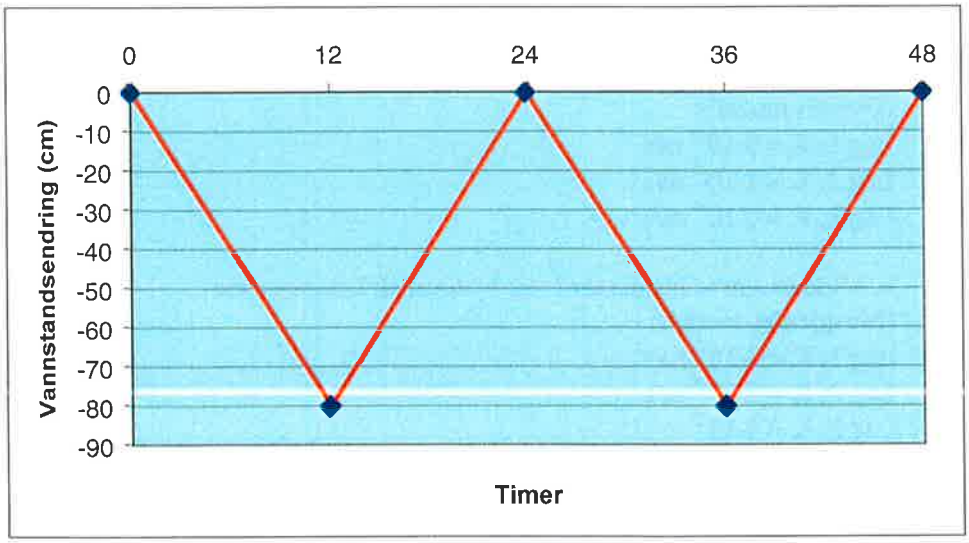
   a. Lav skråning (2 m), som ved Musgjerdet
   b. Høy skråning (4 m), som ved Øyeren

3. Vannstandsendringer
   a. Uke (1 ukessyklus, eksempelvis Øyeren)
   Ned 67 cm over 5 døgn, deretter opp 67 cm over 2 døgn, se Figur 4-4



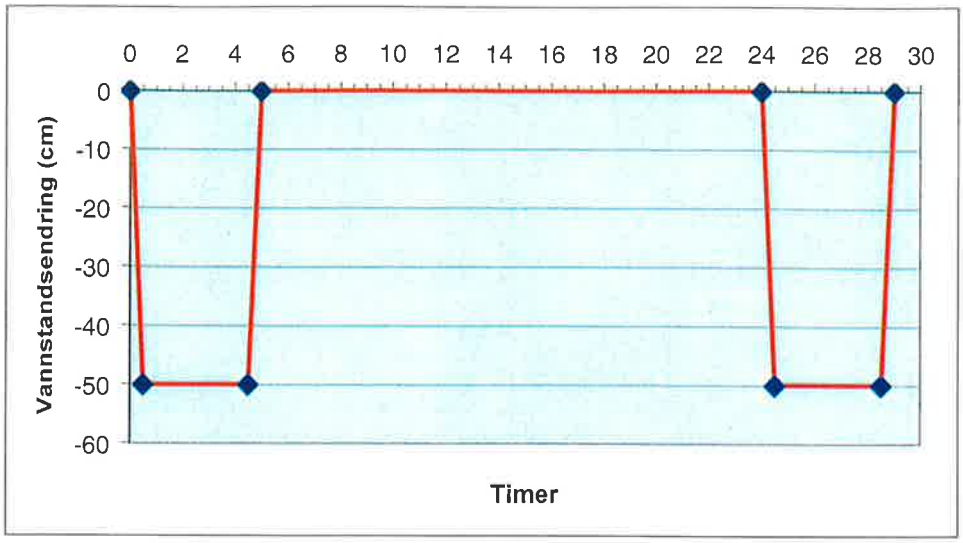
Figur 4-4. Vannstandsendring (3a) - uke.

b. Døgn (1 døgnsyklus, eksempelvis Vinjevatn)
Ned 0,8 m over ½ døgn, deretter opp 0,8 m over ½ døgn, se Figur 4-5



Figur 4-5. Vannstandsendring (3b) – døgn.

c. 5 timer (1 døgnsyklus, tenkt eksempel)
Ned 0,5 m over ½ time, konstant vannstand over 4 timer, opp 0,5 m over ½ time, konstant vannstand i 19 timer, deretter ny syklus, se Figur 4-6



Figur 4-6. Vannstandsendring (3c) – 5 timer.

4. Initialvannstand i elv/magasin (dybde over bunn)
   a. 2,3 m
   b. 1,0 m
   c. 1,4 m

5. Grunnvannstand omtrent 90 m fra skråningen
   a. Middelvannstand i elv/magasin (se parameter nr. 3 og 4)
   b. Grunnvannstand ca. 0,5 m over middelvannstand i elv/magasin - høy

Kombinasjonen av de forskjellige parametrene er vist i en matrise under (Tabell 4-2). Den første simuleringen er av utgangsmodellen. I de etterfølgende simuleringene er det byttet ut en eller flere verdier fra en simulering til en annen. Simulering 9, 10 og 11 er kjørt som stasjonær (ingen endring i vannføring/vannstand). Hensikten med endring av de forskjellige verdiene er for å utføre en enkel følsomhetsanalyse av de enkelte parametrene. Et eksempel er simulering nr. 2 i tabell 4.2 der hydraulisk ledningsevne er endret i modellen for å kunne vurdere hvilken betydning dette hadde på skråningsstabilitet og grunnvannserosjon i forhold til simulering nr. 1. En sammenstilling av simuleringene er vist i Vedlegg B. Simuleringene er gruppert slik at det er lettere å sammenligne resultatene og se effekten av endringen av de forskjellige parametrene.

Simulering	Tittel	Hydraulisk ledningsevne / K-verdi	Skråningshøyde (H)	Vannstands-endring	Initialvannstand	Grunnvannstand
1	Utgangsmodell	1b stor	2a lav	3b døgn	4b lav	5a mid.
2	Effekt av hydraulisk ledningsevne / kornfordeling	1a liten	2a lav	3b døgn	4b lav	5a mid.
3	Effekt av skråningshøyde	1b stor	2b høy	3b døgn	4b lav	5a mid.
4	Effekt av vannstandsendring	1b stor	2a lav	3a uke	4b lav	5a mid.
5	Effekt av vannstandsendring	1b stor	2a lav	3c 5 timer	4b lav	5a mid.
6	Effekt av initialvannstand	1b stor	2b høy	3b døgn	4a høy	5a mid.
7	Effekt av initialvannstand	1b stor	2b høy	3b døgn	4c mid-dels	5a mid.
8	Effekt av grunnvannstand	1b stor	2a lav	3b døgn	4b lav	5b høy
9	Stasjonære forhold (Musgjerdet-modell)	1b stor	2a lav	sta-sjonær	4c mid-dels	5b høy
10	Stasjonære forhold (Høy skråning, grove masser)	1b stor	2b høy	sta-sjonær	4c mid-dels	5b høy
11	Stasjonære forhold (Øyeren-modell)	1a liten	2b høy	sta-sjonær	4c mid-dels	5b høy
12	Øyeren-modell	1a liten	2b høy	3a uke	4c mid-dels	5a mid.
13	Øyeren-modell med høy K-verdi for lag 3	1a* liten	2b høy	3a uke	4c mid-dels	5a mid.
14	Øyeren-modell, effekt av vannstandsendring	1a liten	2b høy	3c 5 timer	4b lav	5a mid.

Tabell 4-2. Valg av parameterverdier i de enkelte simuleringsforsøkene. Tall- og bokstavkoden relateres til beskrivelsen av parametrene i avsnitt 4.3. 1a* er Øyeren-modellen med grove løsmasser i lag 3 (se Figur 4-1 og parameterbeskrivelse i avsnitt 4.3).

4.4. Resultater

Resultatene fra simuleringene er vist i vedlegg B og er gruppert for å kunne lette sammenligningen mellom de enkelte kjøringer. I det etterfølgende er resultatene fra simuleringene kort beskrevet. For alle simuleringene er resultattidspunktet satt til tidspunktet for laveste vannstand i elv/magasin, rett etter en senkning av vannstanden.

1. Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret kornfordeling (simulering 2) og høy skråning (simulering 3)

For alle tre simuleringene strømmer vannet ut av skråningen hovedsakelig i nederste lag (lag 3). Vannstanden i simulering 2 står høyere sammenlignet med simulering 1 og 3 og dette er naturlig ut fra at massene for simulering 2 er finkornige masser. Vannhastigheten ut fra skråningen er omlag den samme for simulering 1 og 3 mens vannhastigheten for simulering 2 er langt lavere. Det gjøres oppmerksom på at hastighetspilene for simulering 2 vist i figuren i vedlegg B er multiplisert med 1000.

For simulering 2 etableres en utstrømningshorisont i det grunnvannspeilet i skråningen er omlag 0,2 meter over vannstanden i elv/magasin.

2. **Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret vannstandsvariasjon, simulering 4 og 5**

   Vannhastigheten ut av skråningen for simulering 1, 4 og 5 reflekterer tempoet til vannstandsendringene. Den raskeste vannstandsendring fås ved simulering 5 (1/2 times nedtapping) og dette gir også de største hastighetene ut av skråningen.

3. **Simulering 3 sammenlignet med endret initialvannstand, simulering 6 og 7**

   Simuleringene 3, 6 og 7 viser at utstrømningshastigheten reduseres med økende utstrømningsfront i skråningen. Simulering 6 viser forholdsvis lave hastigheter langs hele skråningen.

4. **Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret grunnvannstand (simulering 8)**

   Simulering 8 viser en økt strømningshastighet ut av skråningen på grunn av en økt grunnvannsgradient mot elven sammenlignet med simulering 1, begrunnet i en høyere grunnvannstand.

5. **Simulering 10 sammenlignet med endret skråningshøyde/initialvannstand (simulering 9) og endret kornfordeling (simulering 11)**

   Vannhastigheten i lag 3 er størst for simulering 9 i forhold til simulering 10 og 11. Hastigheten for simulering 11 er betydelig lavere enn for de andre to simuleringene og dette er et direkte resultat av lavere vannledningsevne.

6. **Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser / vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)**

   Forskjellene i vannhastighet gjenspeiler forskjellene i vannstandsendring. Simulering 3 og 14 har vannstandsendringen over henholdsvis et døgn og fem timer, mens simulering 12 og 13 har vannstandsendringen over en uke. De finkornige massene i simulering 12 og 14 medfører en betydelig lavere vannhastighet ut av lag 3 i forhold til simulering 3 og 13.

Største grunnvannsgradient under grunnvannspeilet på skråningen er vist i Tabell 4-3. De største verdiene oppstår når grunnvannspeilet ligger i fine masser ved laveste vannstand i elv/magasin (like etter en høy vannstand). I simulering 2 er gradienten 0,7 og der er benyttet lav skråning, fine masser og vannstandsendring over et døgn. I simulering 14 er forholdene endret ved at skråningen er høy og at vannstandsendring skjer over fem timer (raskest av de simulerte vannstandsendringer). Simulering 5, som omfatter en lav skråning, grove masser og en vannstandsendring over fem timer, viser forholdsvis høye grunnvannsgradienter.

Simulering nr.	Største gradient (i_{max}) under grunnvannsspeilet
1	0,07
2	0,71
3	0,09
4	0,06
5	0,17
6	0,23
7	0,07
8	0,11
9	0,01
10	0,02
11	0,01
12	0,31
13	0,03
14	2,31

Tabell 4-3. Beregnede grunnvannsgradienter (i_{max} = dh/dl).

Grunnvannsgradienter angitt i tabell 4-3 viser store variasjoner med de største verdiene i simuleringene med høy skråning med fine masser og en vannstandsendring over et døgn (simulering nr. 2) eller over fem timer (simulering nr. 14).

5. STABILITETSANALYSE

5.1. *Innledning*

Målet med å utføre stabilitetsanalyser har vært å analysere sikkerheten mot utglidning av aktuelle skråninger.

5.2. *Modell/analyse*

Stabilitetsanalyse av aktuell skråning er utført med programmet SLOPE/W. Data på grunn er hentet inn i SLOPE/W fra grunnvannsmodellering utført i SEEP/W. Det er utført stabilitetsanalyser basert på tilsvarende simuleringer som er utført for grunnvannsmodelleringene vist i Tabell 4-2. Det er utført to typer stabilitetsberegninger:

1. **Tradisjonell stabilitetsanalyse.** Det er utført stabilitetsanalyser basert på tilsvarende 14 simuleringer fra grunnvannsmodelleringene vist i Tabell 4-2. Dette inkluderer følgende forutsetniger:
   - Effekt av vegetasjon er ikke tatt med.
   - Virkning av umettet sone over grunnvannspeil er ikke tatt med. I stabilitetsanalysene er poretrykk over grunnvannspeilet (hentet inn fra SEEP/W) lik null.

2. **Stabilitetsanalyse vedrørende umettet sone over grunnvannspeil og vegetasjon.** To av de 14 simuleringene er mer inngående studert med fokus på effekt av vegetasjon og virkning av umettet sone.

Skjærstyrkeparametre (φ', c') som er benyttet i stabilitetsanalysene er basert på antagelser vedrørende de aktuelle massenes kornfordeling, se Figur 4-1. Øvrige parametre som er benyttet i beregningene er:

- Tyngdetetthet $\gamma = 20$ kN/m^3

For enkelhets skyld er $\varphi' = \varphi$ og $c' = c$. Beregninger er utført med beregningsmetodene Ordinær, Bishop og Janbu.

Ordinær beregningsmetode, som også er kalt **Fellenius** metode, tilfredsstiller bare momentlikevekt og ignorerer alle kreftene mellom de enkelte lamellene. Denne forenklingen kan resultere i avvik for beregnet sikkerhetsfaktor opptil så mye som 60 prosent (Whitman and Bailey, 1967). Ordinær beregningsmetode bør derfor benyttes med forsiktighet.

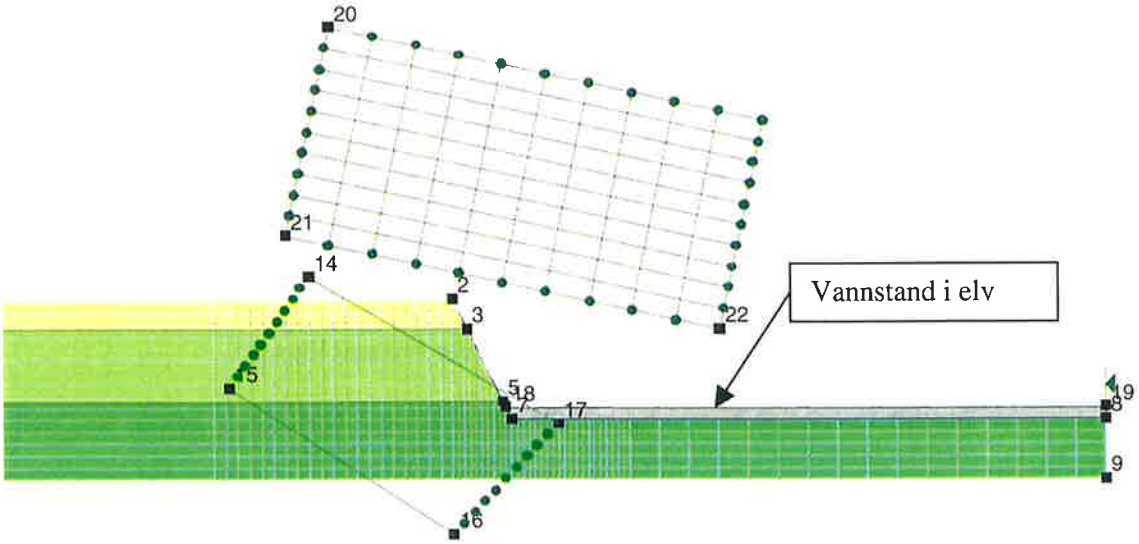
Bishops forenklede beregningsmetode betrakter horisontale krefter med null skjærkraft mellom lamellene og tilfredsstiller overordnet moment likevekt.

Janbus forenklede beregningsmetode betrakter også horisontale krefter med null skjærkraft mellom lamellene og tilfredsstiller overordnet kraftlikevekt.

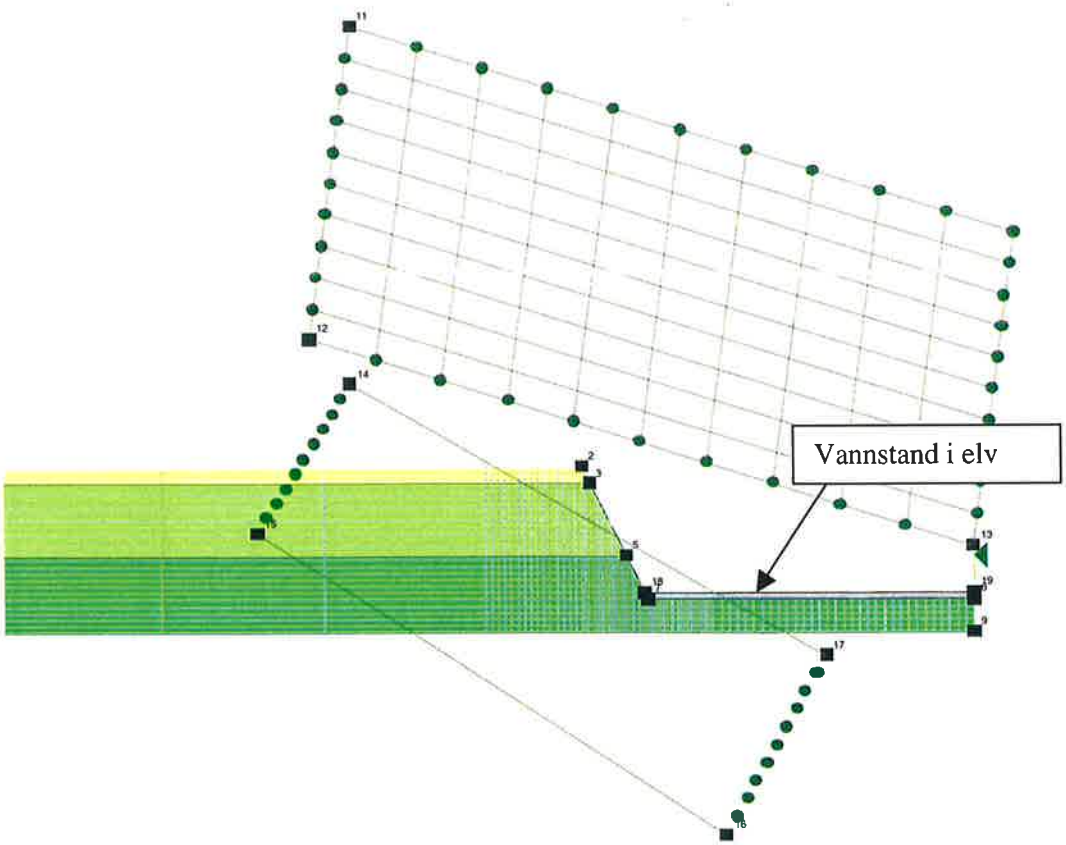
SLOPE/W gir også muligheter for å gjennomføre stabilitetsanalyser med andre beregningsmetoder, men disse er ikke utført.

For de tradisjonelle stabilitetsanalysene er det små avvik mellom beregningsresultatene som de tre ulike metodene gir. De detaljerte stabilitetsanalysene gir noe avvik i beregningsresultatene mellom de ulike beregningsresultatene.

Figur 5-1 og Figur 5-2 viser variasjonsområde for sirkelsentrum i aktuelle glidesirkler for henholdsvis lav og høy skråning. Det er etablert et rutenett over skråningene på 10 x 10 = 100 mulige sirkelsentrum i aktuelle glidesirkler. Inne i selve skråningen er det etablert variasjonsområde for 10 ulike radier for glidesirkler. Radien går fra sirkelsentrum og vinkelrett på de viste linjene. SLOPE/W beregner alle kombinasjoner av aktuelle sirkelsentrum og radier og beregner minimumsverdi av sikkerhet mot utglidning. Denne glidesirkelen er kalt kritisk glidesirkel.



Figur 5-1. Etablering av rutenett for sentrum av glidesirkler og variasjonsområde for radius. Lav skråning - H = 2,0 m.



Figur 5-2. Etablering av rutenett for sentrum av glidesirkler og variasjonsområde for radius. Høy skråning, H = 4,0 m.

Figur 5-1 og Figur 5-2 viser også vannstand i elv/magasin (ytre vannstand) som legges inn for hvert enkelt beregning.

5.3. *Resultater*

5.3.1. *Generelt*

Sikkerhet mot utglidning er lavest når grunnvannspeilet (indre vannstand) er på et høyt nivå samtidig som at vannstanden i elv/magasin er på laveste nivå. Høy indre vannstand øker de drivende krefter og lav ytre vannstand reduserer de stabiliserende krefter for aktuell glideflate. En sikkerhetsfaktor under 1,0 vil teoretisk gi utglidning av skråningen basert på aktuell modell.

Resultatene er vist grafisk i vedlegg C for alle 14 simuleringene. I vedlegg C er det kun vist kritiske glidesirkler fra Bishops beregningsmetode.

5.3.2. *Tradisjonell stabilitetsanalyse*

Beregningsresultatene vedrørende sikkerhet mot utglidning er presentert i Tabell 5-1.

Simulering	Tittel	Hydraulisk ledningsevne / Kornfordeling	Skråningshøyde (H)	Vannstand i elv (Ytre vannstand)	Sikkerhetsfaktor mot utglidning		
					Ordinary	Bishop	Janbu
1	Utgangsmodell	stor	lav	0,2	1,96	1,96	1,98
2	Effekt av hydraulisk ledningsevne / kornfordeling	lav	lav	0,2	1,70	1,70	1,72
3	Effekt av skråningshøyde	stor	høy	0,2	1,36	1,37	1,35
4	Effekt av vannstandsendring	stor	lav	0,33	1,96	1,96	1,97
5	Effekt av vannstandsendring	stor	lav	0,2	1,96	1,96	1,98
6	Effekt av initialvannstand	stor	høy	1,5	1,37	1,40	1,37
7	Effekt av initialvannstand	stor	høy	0,6	1,36	1,37	1,35
8	Effekt av grunnvannstand	stor	lav	0,2	1,96	1,96	1,98
9	Stasjonære forhold (Musgjerdet-mod.)	stor	lav	1,4	2,24	2,33	2,31
10	Stasjonære forhold (Høy skråning, grove maser)	stor	høy	1,4	1,37	1,39	1,37
11	Stasjonære forhold (Øyeren-modell)	lav	høy	1,4	1,10	1,12	1,18
12	Øyeren-modell	lav	høy	0,73	1,09	1,08	1,10
13	Øyeren med høy K-verdi for lag 3	lav	høy	0,73	1,21	1,23	1,20
14	Øyeren - effekt av vannstandsendring	lav	høy	0,2	1,07	1,05	1,08

Tabell 5-1. Parameterverdier og resultater fra de enkelte simuleringsforsøkene.

Resultatene fra simuleringene er vist i vedlegg C1 og er gruppert for å kunne lette sammenligningen mellom de enkelte kjøringer. I det etterfølgende er simuleringene beskrevet kort i tilsvarende rekkefølge som i vedlegg B og C og kapittel 4.4.

1. **Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret kornfordeling (simulering 2) og høy skråning (simulering 3)**

   Simuleringene viser at sikkerheten mot utglidning blir mer redusert ved økning av skråningshøyde fra lav til høy enn ved endring av hydraulisk ledningsevne fra stor til liten.

2. **Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret vannstandsendring, simulering 4 og 5**

   Simuleringene viser at sikkerheten mot utglidning er tilnærmet uendret som følge av tempoet til vannstandsendringen. Bakgrunnen er at aktuell kritisk glidesirkel i liten grad kommer i berøring med grunnvannspeilet og laveste grunnvannstand i elv/magasin er tilnærmet lik.

3. **Simulering 3 sammenlignet med endret initialvannstand, simulering 6 og 7**

   Simuleringene for de aktuelle skjærflatene viser at sikkerheten mot utglidning for en høy skråning påvirkes forholdsvis lite av hvor hurtig vannstandsendringene er.

4. **Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret grunnvannstand (simulering 8)**

   Simuleringene for de aktuelle skjærflatene viser at sikkerheten mot utglidning ikke påvirkes i noen særlig grad når vannstanden endres over et så langt tidsrom som 12 + 12 timer.

5. **Simulering 10 sammenlignet med endret skråningshøyde/initialvannstand (simulering 9) og endret kornfordeling (simulering 11)**

   Simulering 10 sammenlignet med simulering 9 viser at sikkerheten mot utglidning forbedres betydelig ved redusert skråningshøyde (fra høy til lav) og ved økt grunnvannstand/vannstand i elv/magasin når det er stasjonære forhold.

   Simulering 11 sammenlignet med simulering 9 viser at sikkerheten mot utglidning reduseres ved endring av middels grove løsmasser til finkornige masser når det er stasjonære forhold.

6. **Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser/vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)**

   Simulering 12 sammenlignet med simulering 3 viser at sikkerheten mot utglidning reduseres ved endring av middels grove løsmasser til finkornige masser.

   Simulering 13 sammenlignet med simulering 12 viser at sikkerheten mot utglidning forbedres når massene i lag 3 endres fra finkornige til middels grove masser.

   Simulering 14 viser at av alle undersøkte tilfeller oppstår lavest sikkerhet mot utglidning når følgende forhold inntreffer:
   - Høy skråning
   - Finkorning masser
   - Hurtig vannstandsendring

5.3.3. *Stabilitetsanalyse vedrørende umettet sone over grunnvannsspeil og vegetasjon*

For å studere virkningen av umettet sone over grunnvannsspeil og vegetasjon er det utført en mer detaljert studie av en lav (simulering 2) og en høy skråning (simulering 12) med lav sikkerhet mot utglidning. Begge disse simuleringene har finkorninge masser.

Det er utført analyser på den samme glidesirkelen som var kritisk glidesirkel i beregningene vist i Tabell 5-1. For simulering 2 gav beregningsmetodene Ordinary, Bishop, og Janbu samme sirkelsentrum og radius for kritisk glidesirkel. For simulering 12 gav beregningsmetodene Ordinary, og Janbu samme sirkelsentrum og radius for kritisk glidesirkel, mens Bishop gav en annen kritisk glidesirkel.

Tabell 5-2 viser beregningsresultat av sikkerhetsfaktor mot utglidning ved simulering av **vegetasjon** der virkningen av en horisontal kraft på ca. 20 kPa som gir positiv støtte ca. 0,2 m under terreng tas med i stabilitetsvurderingene.

Resultatene viser at en lav (2 m) skråning med de aktuelle massene kan få en voldsom forbedring av sikkerhet mot utglidning. For en høy (4 m) skråning er derimot økning i sikkerhet mindre. Her viser de forskjellige beregningsmetoder relativt stor variasjon i resultat med økning fra 5 - 40 %.

Simulering	Tittel	Sikkerhetsfaktor mot utglidning (Kfr. Tabell 5-1).			Sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av vegetasjon		
		Ordinary	Bishop	Janbu	Ordinary	Bishop	Janbu
2	Effekt av hydraulisk ledningsevne / kornfordeling	1,695	1,697	1,717	5,357	Ingen løsning	Ingen løsning
12	Øyeren-modell	1,087	1,080	1,099	1,328	1,137	1,544

Tabell 5-2. Beregning av sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av vegetasjon

En lav skråning får også en økt effekt med hensyn til sikkerhetsfaktor dersom en tar hensyn til **skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannspeilet**. Virkning varierer avhengig av valgt beregningsmetode.

Tabell 5-3 viser beregningsresultat ved simulering av skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannsspeilet. Beregningene er utført med verdier for φ_b i henhold til Figur 4-1.

Resultatene viser at sikkerheten mot utglidning øker dersom en tar hensyn til effekt av skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannsspeilet. Økningen er 15 - 25 %.

Simulering	Tittel	Sikkerhetsfaktor mot utglidning (Kfr. Tabell 5-1)			Sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av skjærstyrke-tillegg i umettet sone over grunnvannsspeilet		
		Ordinary	Bishop	Janbu	Ordinary	Bishop	Janbu
2	Effekt av hydraulisk ledningsevne / kornfordeling	1,695	1,697	1,717	1,937	1,912	1,998
12	Øyeren-modell	1,087	1,080	1,099	1,336	1,256	1,402

Tabell 5-3. Beregning av sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannsspeilet.

Tabell 5-4 viser beregningsresultat av sikkerhetsfaktor mot utglidning ved simulering av **vegetasjon og effekt av skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannsspeilet**.

Simulering	Beskrivelse	Sikkerhetsfaktor mot utglidning (Kfr. Tabell 5-1).			Sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av vegetasjon		
		Ordinary	Bishop	Janbu	Ordinary	Bishop	Janbu
2	Effekt av hydraulisk ledningsevne / kornfordeling	1,695	1,697	1,717	5,918	Ingen løsning	Ingen løsning
12	Øyeren-modell	1,087	1,080	1,099	1,596	Ingen løsning	Ingen løsning

Tabell 5-4. Beregning av sikkerhetsfaktor mot utglidning. Effekt av vegetasjon og skjærstyrketillegg i umettet sone over grunnvannspeilet

Det kan konkluderes med at stabiliteten for lave skråninger "kontrolleres" av vegetasjon og kapillære krefter. For skråninger høyere enn 2 - 4 m utgjør kapillære krefter og krefter fra vegetasjon en betydelig andel av det stabiliserende motholdet i jordmassen.

6. DISKUSJON - VURDERING AV EROSJON / UTGLIDNING

Det er vist, særlig gjennom diskusjonen i kapittel 3, at tradisjonell stabilitetsanalyse vil være beheftet med stor usikkerhet når den benyttes på lave erosjonsskråninger. Usikkerheten skyldes dels vanskeligheter med å bestemme riktige parameterstørrelser og dels at analysen utelater virkningen av andre viktige faktorer som kapillaritet, vekstlag, overflateerosjon m.m. Disse er det forsøkt å ta hensyn til i analysearbeidet, både m.h.t. størrelse og virkemåte samt innvirkning på stabiliteten. Resultatene etter dette synes å være i bedre samsvar med observerte skråninger.

Resultatene fra simulering 12 viser at for høye skråninger (4 m) med et vegetasjonsdekke og et negativt poretrykk i den umettede sonen, er skråningen teoretisk stabil (se Tabell 5-4). Resultatene fra samtlige simuleringer antyder stabile skråninger gitt de parametrene som er vurdert, og stabiliteten øker når effekten av vegetasjon og negativ poretrykk er inkludert. Samtidig observerer man utglidninger og erosjon i slike skråninger i naturen (f.eks. Øyeren).

Erfaring med tradisjonelle stabilitetsanalyser og resultater i marken over lang tid ligger til grunn for sikkerhetskriteriene nedfelt i norsk standard (NS 3480). For stabilitetsanalyser opereres det med sikkerhetsfaktorer (materialkoeffisienter) som er forholdet mellom drivende og stabiliserende krefter. Sikkerhetsfaktoren skal være mellom 1,3 og 2,0 avhengig av konsekvensene ved et brudd og type analyse (laveste anbefalte verdier). Sikkerhetsfaktoren skal bl.a. gi dekning for usikkerheten i de generelle antagelser som gjøres:

- deformasjonskarakteristikken og utvikling av bruddflater er lik for alle typer involverte masser
- at det er like stor sikkerhet mot brudd langs hele glideflaten uansett masse
- analysen er todimensjonal

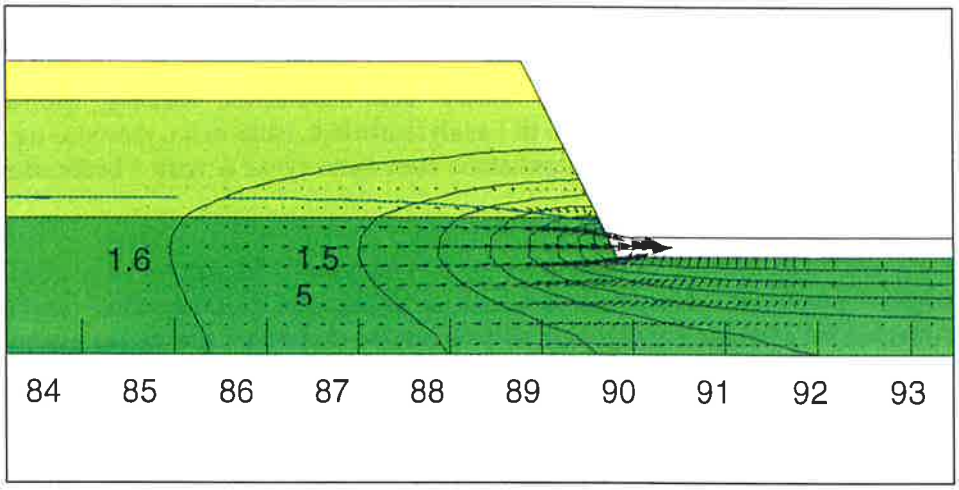
Vanligvis vil ikke teoretisk glideflate være identisk med bruddflaten i naturen, men den vil gi et akseptabelt svar på sikkerheten gjennom en analyse.

Som en konsekvens av dette er det i dag ikke mulig å benytte sikkerhetsnivåene i norsk standard for å avgjøre om de lave erosjonsskråningene har tilfredsstillende stabilitet når de utsettes for effektregulering. Før dette kan skje må det iverksettes et mer omfattende analysearbeid med muligheter for oppfølging og målinger in-situ.

Det er tydeligvis andre parametersammensetninger som også er viktige for stabiliteten av skråninger enn de kombinasjonene som er vurdert i disse stabilitetsanalysene. Et viktig parameter er tid. Med tiden vil vannføringen i elven ha en naturlig innvirkning på skråningen på grunn av bl. a. sedimentologiske prosesser. Spørsmålet som må stilles er om effektregulering endrer rammebetingelsene eller farten på de sedimentologiske prosessene. Dette endrer dermed tidsaspektet fram til en kritisk tilstand i skråningen. Skråningsgeometrien er i konstant endring og styres av erosjon, sedimenttransport og stabilitet til skråningen.

De sedimentologiske prosessene styres i forskjellig grad av flere av de parametrene som ble vurdert i dette prosjektet. Løsmassenes kornfordeling er viktig, også med hensyn til opprinnelig skråningsstabilitet (over og under grunnvannspeilet). Fine masser, f. eks. silt, vil vise et stort undertrykk i umettet sone, noe som øker stabiliteten i skråningen. De samme fine massene har også en lav hydraulisk ledningsevne sammenlignet med grovere masser, som kan bety at ved hurtig endring av vannstand i elv/magasin (se simulering Figur 6-1 og Figur 6-3), blir det en forholdsvis høy grunnvannsgradient i skråningen under grunnvannspeilet. Det kan også oppstå en utstrømningshorisont (seepage face) i skråningen

der grunnvannspeilet krysser skråningen over vannstand i elven eller magasinet (se Figur 6-1).

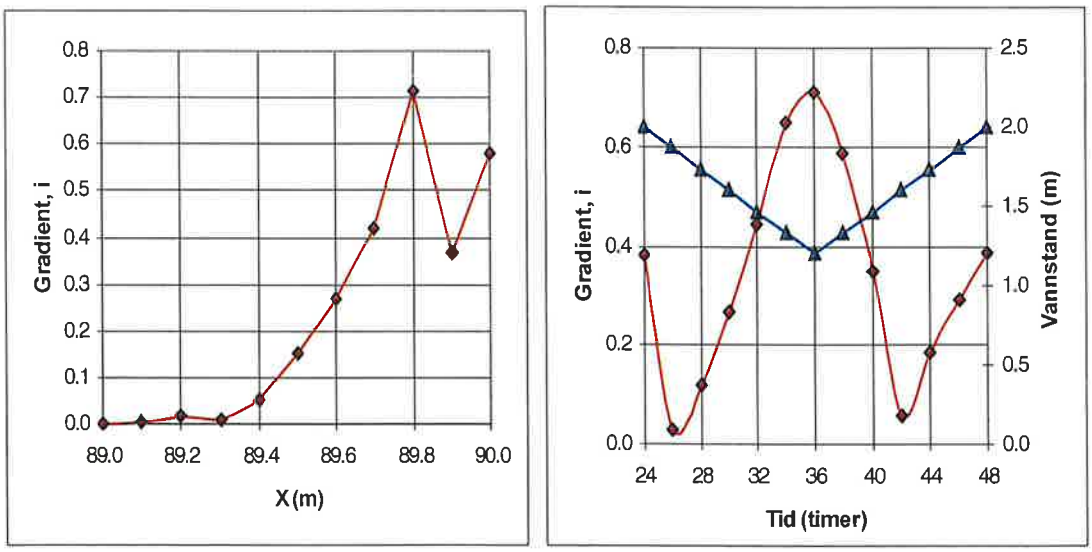


Figur 6-1. Ekvipotensiallinjer med trykk i m for simulering 2.

En høy grunnvannsgradient i skråning og bunn vil redusere løsmassenes motstand mot erosjon. Den høyeste gradienten i prosjektets simuleringer oppsto i de tilfeller der det var fine masser og hurtig senkning av vannstanden i elv/magasin. I slike situasjoner vil erosjonsmotstanden være minst. Basert på de beregnede grunnvannsgradientene vist i Tabell 4-3, ser følgende situasjoner ut til å være mest kritiske:

1. fine masser (finsand, silt og leire)
2. rask vannstandsendring d.v.s. over et døgn eller noen timer

Slår grunnvannstanden ut i en skråning (se Figur 6-1) kan det gjøres en bedømmelse av langtidsstabiliteten til overflaten i dette området som angitt i kapittel 3.4.2. Når vannstanden er på det laveste i simulering 2 er retningen på grunnvannstrømmen horisontal ved vannspeilet (x = 89,8 m) og gradienten når her sitt maksimum i_{max} = 0,7 (se Figur 6-1 og venstre del av Figur 6-2).



Figur 6-2. Grunnvannsgradienten (rød kurve) fra topp til bunn av skråningen i Figur 6-1 og gradientens og vannstandens tidsvariasjon (blå kurve) ved vannspeilet (x = 89,8 m).

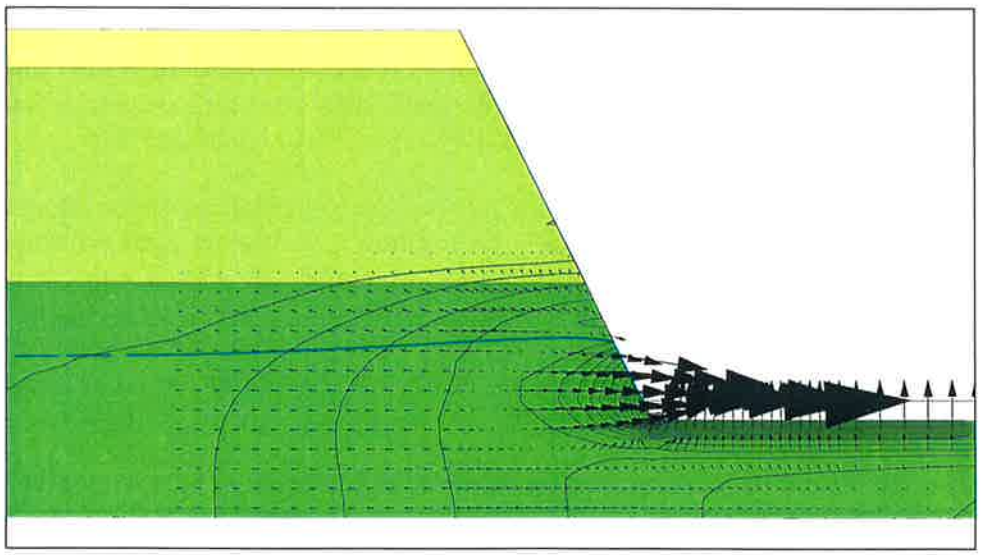
Effekten av grunnvannstrømmen tilsvarer en økning i skråningsvinkelen på $\omega = 20°$. Forholdet mellom drivende og stabiliserende krefter er gitt av ligning (1) og (3) og blir F = tan 31° / tan (63°) = 0,31 (tørre kohesjonsløse forhold) og F = tan 31° / tan (63° + 20°) = 0,07 med grunnvannstrøm. Dette viser at massene i overflaten av skråningsfoten i utgangspunktet ikke er langtidsstabile (som ventet) og at utstrømming av grunnvann forverrer denne situasjonen betydelig.

Denne økte faren for erosjonen vil kunne gi små utglidninger og fjerne finstoff fra massene ytterst i skråningen. Dette kan for ensgraderte masser resultere i dannelse av små raviner, så utskalkinger og til slutt redusert stabilitet. Er massen velgradert kan erosjon av finstoff gi et fritt drenerende lag ytterst som etterhvert kan reduserer erosjonen og overflaterasene.

Disse forholdene er begrenset både i tid og rom. Høyre del av Figur 6-2 viser gradientens størrelse i skråningens overflate ved vannspeilet i løpet av andre døgnsyklus og vannstand utenfor skråningen. Grunnvannstrømmen er først rettet innover i skråningen med $i = 0,4$ fordi vannstanden nettopp har gått opp. D.v.s. at vannstanden er høyere enn poretrykksnivået. Når vannstanden synker reduseres den innadretted strømningen og etter ca. 2 timer snur den ($i \approx 0$, d.v.s. vannstand = poretrykksnivå). Deretter øker den utadrettede grunnvannstrømmen og gradienten når sin største verdi idet vannstanden er lavest. Når vannstanden stiger igjen minker den utadrettede strømmen og til slutt snur den igjen.

Av dette ser man at de ugunstigste forholdene bare varer i noen timer ($i_{ut} > 0,4$ i 8 timer), men kommer til gjengjeld igjen hvert døgn ved effektregulering. De er også begrenset først og fremst til området mellom utslaget av grunnvannet og bunn av elv/magasin, d.v.s. et begrenset men sårbart område.

I simulering 14 består nederste lag av sandig silt som i simulering 2, men laget er tykkere slik at grunnvannet ligger kun i dette laget. Vannstandsendringen er svært rask: ned 0,5 m i løpet av 0,5 time. Som Figur 6-3 viser skjer vannstandsendringen så raskt at grunnvannstrømmen 1 - 2 m inn i skråningen ikke har rukket å snu. Da det er fine masser med lav hydraulisk ledningsevne rekker ikke trykket å utlignes. Det fører til et overtrykk i massene, illustrert med de tette ekvipotensiallinjene. Dette er grunnen til den svært høye verdien på grunnvannsgradienten ($i = 2,3$ i Tabell 4-3).



Figur 6-3. Ekvipotensiallinjer og strømmønster for simulering 14.

Denne situasjonen illustrerer problemstillinger som bør forfølges videre.

Situasjoner med grunnvannserosjon oppstår trolig fra tid til annen også uten effektregulering, men med effektregulering vil slike situasjoner kunne oppstå døgnlig. Omfanget av grunnvannserosjonen kan dermed bli betydelig større etter effektregulering.

I tillegg vil grunnvann som strømmer ut mot profilet lavere enn vannstanden i elven (se Figur 6-1 og Figur 6-3) gi en strømkraft som medfører at erosjonsmotstanden reduseres. Det skjer ved at strømkraften reduserer den effektive spenningen kornene i mellom. Derved kan vann som strømmer ut av denne overflaten (f.eks. elvebunn), både mellom høyeste og laveste vannstand og under laveste vannstand, lettere slite løs partikler og føre disse vekk. I den grad effektreguleringen fører til at disse forhold oppstår eller forverres vil erosjonen øke. Stabilitetsmessig kan situasjonen analyseres ettersom geometrien på skråningen og grunnvannsgradienten endres.

De masser som kan få problemer ved effektregulering er masser av sand og silt uten leire. I leire eller grov, åpen grus er ikke dette noe problem. Leire vil ha kohesjon stor nok til å motstå kreftene fra grunnvannstrømmen, og i grov, åpen grus vil grunnvannstanden følge vannstanden i elven/magasinet slik at tilleggspåvirkningen ikke oppstår.

7. SIKRINGSTILTAK

Det første skritt for å vurdere tiltak mot erosjonsskader eller utglidninger som oppstår som følge av en effektregulering er å få klarhet i massetyper, belastninger, skadekonsekvenser osv. Det er de rent lokale forhold som vil være avgjørende.

Eksponerte mellomjordarter (silt-sand-fin grus) må kartlegges. Likeså graden av eksponering (vekstlag, blottleggelse, erosjonshud). Skråningsgeometri og vekstlag på og over skråningen må bestemmes. Til sammen vil dette danne et godt grunnlag for vurderingen av eventuelle tiltak.

Det forventes ikke tiltak i lave erosjonsskråninger med godt, heldekkende vekstlag og hvor massene består av leire eller grov grus.

Dersom det er tvil om nødvendigheten av tiltak kan dette utestå til en har høstet noe erfaring med effektreguleringen. Siden erosjon i mellomjordarter kan utvikle seg raskt, bør det foretas befaring relativt hyppig inntil man har oversikt over tidsutviklingen. Simuleringene viser at det særlig er området ved og under vannkanten som vil få økt erosjon som følge av effektregulering. Dette kan være vanskelig å observere før utglidninger skjer.

Det viktigste ved sikringstiltaket mot økt erosjon fra grunnvannsstrømming vil være å ivareta vanngjennomgangen i massene ved og under vannkanten gjennom tilfredsstillende filter og separasjonssjikt. Beskyttelsen mot vannsiden må utføres etter de rent lokale forhold. Denne beskyttelsen kan være plastringsstein, samfengte masser eller en kombinasjon av dette og armeringsmatter eller vegetasjon. Skal vegetasjon benyttes må dette være vegetasjon som tåler stor variasjon i vannstand. Den må kunne stå både neddykket og tørt.

Sikringstiltakene bør konsentreres om sikring av reguleringssone og skråningsfot.

I tillegg til å vurdere erosjonssikring må det vurderes om ikke årsaken til erosjonen: rask vannstand- og vannføringsvariasjon kan påvirkes. Tiltak som demper vannstand- og vannføringsvariasjonen er initialvannstand i vassdraget (fra f.eks. minstevannsføring eller

terskler), fordrøyningsbasseng ved kraftverkets utløp og endret reguleringsforløp. Disse tiltakene er beskrevet og diskutert i rapporten "Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak" (Løvoll, 1998).

8. KONKLUSJON

Simuleringene utført i prosjektet antyder at de beregnede skråninger er stabile mot større utglidninger. Stabiliteten øker betydelig når man inkluderer effekten av vegetasjon og undertrykk i umettet sone. Overflaten av skråningen er derimot svært utsatt i de tilfeller man får store grunnvannsgradienter. En høy grunnvannsgradient i skråning og bunn vil redusere løsmassenes motstand mot erosjon. Størst gradient får man i skråninger med fine masser og hurtig senkning av vannstand i elv/magasin. Basert på de beregnede grunnvannsgradientene vist i Tabell 4-3, ser følgende situasjoner ut til å være mest kritiske:

3. fine masser (finsand, silt og leire)
4. rask vannstandsendring, d.v.s. over et døgn eller noen timer

I disse tilfellene vil kan man få små lokale utrasninger som følge av grunnvannserosjonen. Dette er i utgangspunktet en langsom prosess som på sikt kan endre skråningen så mye at større utglidninger / avskalkninger kan skje. Effektregulering gjør imidlertid at spesielt store grunnvannsgradienter kan oppstå med en mye høyere frekvens enn det som er naturlig. Dette vil klart akselerere prosessen med erosjon og utrasning men så langt er det ikke klart hvor mye.

Kjenner man massetypene i en skråning (kornfordeling) og forløpet på vannstandsendringene kan man beregne grunnvannspeilets beliggenhet og poretrykket i skråningen (f.eks. ved hjelp av SEEP /W). Dette gir grunnlag for å beregne redusert stabilitet i skråningen (f.eks. ved hjelp av SLOPE /W). Ved hjelp av beregnet størrelse og retning på grunnvannets gradient (fra SEEP /W) og beregningsgrunnlaget presentert i kapittel 3.4.2 kan man så beregne om overflaten av dagens skråning får redusert stabilitet, enten p.g.a. grunnvannserosjon eller utglidning.

9. VIDEREFØRING AV ARBEIDET

Rapporten er det første forsøk på å finne virkningene av effektregulering v.h.a. programmene SEEP/W og SLOPE/W. Det ble nødvendig med mange forenklinger og det er tydelig at andre parametersammensetninger enn de som ble vurdert i dette prosjektet er viktige for stabiliteten av skråninger.

Simulering 2 og 14 er eksempler på situasjoner som bør undersøkes videre. Spesielt bør det gjøres mer arbeid med kombinasjonen fine masser og raske vannstandsendringer.

I simuleringene er det benyttet en lav initial grunnvannsgradient (1/200). Denne er representativ for et flatt område som Øyeren. For området nærmere en dalside som ved Musgjerdet i Sunndal er initiell grunnvannsgradient trolig en 10'er potens større. Denne bør varieres over et større område enn det som er gjort her.

Vegetasjon er lett å observere i feltet og kan øke stabiliteten betydelig. Den er imidlertid vanskelig å kvantifisere. Det anbefales derfor å skaffe mer erfaring på effekten av denne både gjennom litteratursøk og målinger i felt.

SEEP kan modellere kapillareffekter, men de er ikke blitt fullt implementert i de analysene som er presentert (kun simulering 2 og 12). De kapillære prosessene bør inkluderes i modellering av stabilitet i finkornige masser (finsand, silt og leire) for å kvantifisere endring i stabilitet – gjerne ved en sensitivitetsanalyse. Det bør imidlertid først skaffes mer erfaring med bestemmelse av parameterverdiene både gjennom litteratursøk og målinger i felt.

Det beste for begge punktene over vil være å få et godt dokumentert skadetilfelle. Dette tilfellet kan da ettermodelleres.

På bakgrunn av dette kan det utvikles en veiledning som kan brukes i felt for en rask vurdering av stabiliteten / fare for grunnvannserosjon av skråninger. For eksempel kan stabiliteten vurderes ved å sammenligne en naturlig skråning i felt med en forhåndsmodellert skråning beskrevet i veiledningen.

Ved hjelp av de analysemetoder og program som er diskutert i rapporten kan man avgjøre om forholdene for erosjon og utglidninger forverres ved effektregulering eller ikke. Å si hvor mye er vanskeligere og krever mer arbeid både i felt og med analyser.

10. REFERANSER

Aarhaug, O. R. (1984): "Geoteknikk og fundamenteringslære 2", NKI-forlaget.

GEO-SLOPE International (1998): "Users's guide SEEP/W, Version 4", Canada.

GEO-SLOPE International (1998): "Users's guide SLOPE/W, Version 4", Canada.
Norsk Standard (NS) 3480

Gray, G. H. (1994): "Influence of Vegetation on Stability of Slopes". Proceedings, International Conference on Vegetation and Slopes-Stabilisation, Protection and Ecology, Paper No. 2, University Museum, Oxford, 29-30 sept.

Skofteland, E. (1968): "Grunnvannsundersøkelsene i Sunndalen, Rapport nr. 3/68", Vassdragsdirektoratet (NVE), Hydrologisk avdeling, Oslo.

Løvoll, A. (1998): "Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak", rapport nr. 6 i rapportserien til FoU-prosjektet "Effektregulering - miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak". NVE, Oslo.

Pedersen, T. S. (1994): "Væsketransport i umettet sone. Stratigrafisk beskrivelse av toppsedimentene på forskningsfeltet, Moreppen og bestemmelse av tilhørende hydrauliske parametre, del I og II". Cand. scient. oppgave, Inst. for geologi, Universitetet i Oslo, Oslo.

Simons, D. B. and Li, R. M. (1982): "Bank Erosion on Regulated Rivers" presentert i "Gravel bed rivers" av Hey, Bathurst og Thorne, John Wiley & Sons, New York.

Statens Geotekniske Institutt (SGI) (1998): "Informasjon 16".

Wu, T. H., Ristenberg, M. M. og Flege, A. (1994). "Root properties for Design of Slope-Stabilization". Proceedings, International Conferencs on Vegetation and Slopes-Stabilisation, Protection and Ecology, University Museum, Oxford, 29-30 Sept.

A. FAKTORER SOM PÅVIRKER EROSJONSFORHOLDENE

A.1.1. På vannsiden

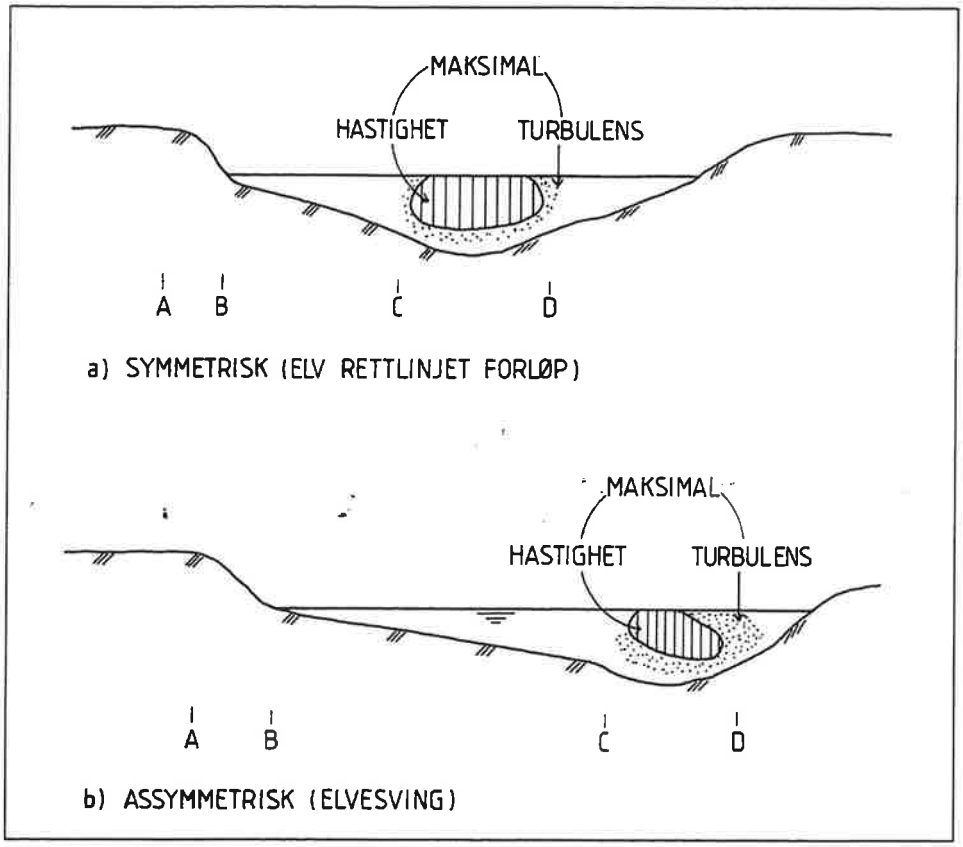
Vannhastighet og elveprofil

Vannhastigheten i elver og bekker bestemmes av bunnhelningen og strømningstverrsnittet i elva.

Ved senking av et vann vil innkommende elver og bekker ofte få høyere vannhastighet i den bratte marbakken slik at likevekten forstyrres. Over marbakken vil tidligere avsatt materiale graves vekk av den innkommende elven, og lokalt vil det dannes et brattere fall med høy vannhastighet. Elva vil så søke å innstille seg på en ny erosjonsbasis. Inntil denne er nådd, kan erosjonen nå langt innenfor den naturlige strandlinjen. Elva vil også kunne skjære seg sideveis, og i ekstreme tilfeller kan gamle elvedelta på denne måte graves bort.

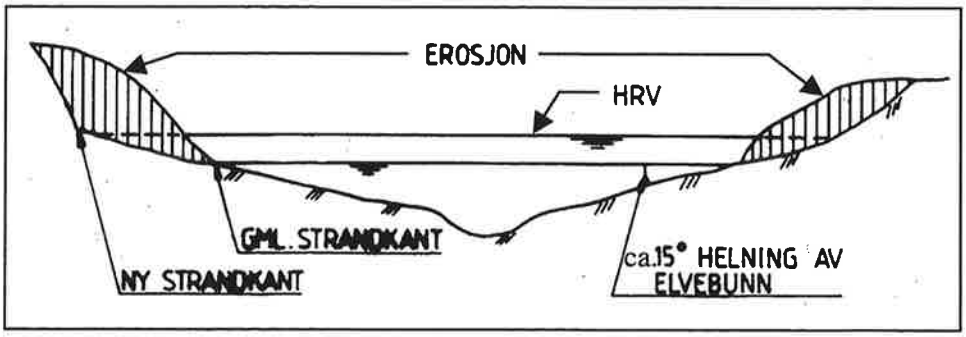
Figur A-1 viser et typisk profil og en hastighetsfordeling på et sted hvor en elv har et rettlinjet forløp. Elveprofilet er delt inn i områdene A-B, B-C, C-D. Området A-B er skråning ned mot elvekant. Ved normal vannføring står vanligvis vannstanden opp til B. Området B-C er elvebunn og C-D er dypål. Vannhastigheten er vanligvis størst over dypålen C-D og avtar mot null til sidene. Figur A-1 viser også det samme et sted hvor elven svinger. Dypålen er her forskjøvet ut mot den ene kanten. Erosjonen vil følgelig være størst i dypålen hvor man har størst hastighet. Utover mot sidene vil erosjonen avta, og i områdene hvor hastigheten er tilstrekkelig liten, vil løsmassene sedimentere. I en sving vil elven følgelig grave i yttersvingen og legge opp løsmasser i innersvingen, slik at elven gradvis forandrer trasé utover samtidig som det bygges opp en ny elveslette i innersvingen. Dette fenomenet kalles meandrering og skjer langsomt. Erosjon ved meandrering kan imidlertid skje svært raskt når det først er flom i vassdraget pga. den økte belastningen i yttersving.

Ved samme vannføring over lengre tid utvikles et tilnærmet "stabilt" elveprofil. Vannhastighet og grunnvannsgradient vil da være i likevekt med helningen av elvebunnen. Forandring av vannstanden eller økt vannføring i elven kan forrykke denne likevekten. Elven vil da erodere i løsmassene eller avsette løsmasser til den på sikt oppnår et profil som er "stabilt" for den nye tilstanden.



Figur A-1. Elveprofiler.

Løsmassene i en elveskråning er mange steder så bratte at de ikke er stabile. Dette vil medføre graving og utrasing inntil det oppnås skråningshelninger som er i likevekt med den nye vannhastigheten og grunnvannsgradienten. Ved å ekstrapolere elvebunnen med helning inn i elveskråningen til den skjærer nivået for HRV, se Figur A-2, kan man gjøre et anslag på hvor meget av løsmassene i elveskråningen som vil erodere på grunn av heving av vannstanden.



Figur A-2. Sannsynlig erosjon ved heving av vannstanden.

Naturlig erosjonshud

Erosjonshuden består vanligvis av en matrise av grus og stein av forskjellig størrelse og form. Erosjonshuden er tynn og sårbar og vaskes frem av flommen eller høy vannhastighet gjennom lengre tid. Erosjonshuden avspeiler den største belastningen bunnprofilet har hatt. Større belastninger vil ødelegge erosjonshuden og gi utvasking.

I hovedsak bestemmer steinens vekt og midlere diameter erosjonshuden (se delprosjekt 1.4 og 1.5 rapport nr. 6 "Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak", NVE (1998)). Kornformen spiller også inn, kantet, rund osv. Flate stein vil flytte relativt lett så sant de ikke står sammenkittet med et visst fall mot strømmen.

Ved regulering eller energikjøring kan vannstrømmen bli drastisk endret slik at erosjonshuden ødelegges. Særlig er virkninger som gir vannstrøm i motsatt retning av den naturlige uheldig.

Vannstand og vannstandsvariasjoner

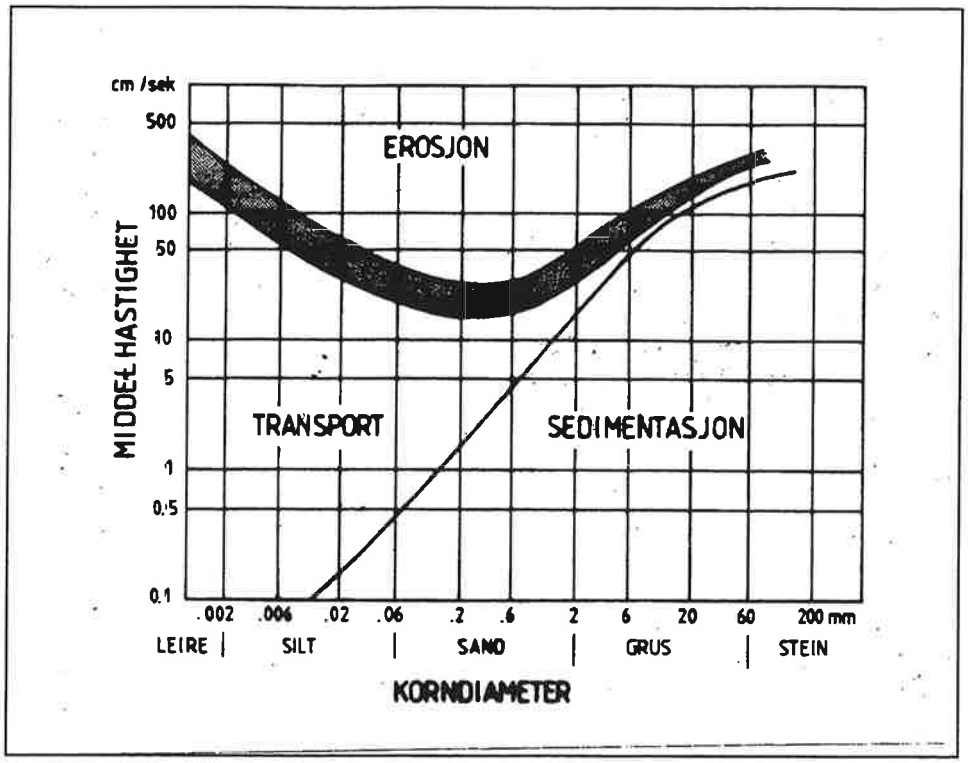
Vannstanden kan være naturgitt eller gitt ved regulering. Erosjon fra flom vil i hovedsak skyldes økt vannhastighet, transporterte masser i elven, økte bølger og ødeleggelse av vegetasjon og erosjonshud. Flomerosjonen kan være mer skadelig på stigende volum enn på topp avhengig av økningen i vannhastigheten. Vanligvis vil ikke flomretardasjonen føre til ytterligere erosjon da den foregår relativt jevnt og sakte. Imidlertid kan senkningen føre til utglidninger særlig i leirige masser grunnet forhøyet grunnvannstand.

Både flom og reguleringer vil påvirke grunnvannstanden slik at det kan oppstå erosjon. Likeledes vil vannstandsendringene medføre at bølgeerosjonen vil foregå over større deler av elveprofilet enn ved fast vannstand. Vannstandsvariasjoner vil ved økning av vannhastigheten opp mot ca. 1 m/s hindre at isen legger seg. Derved vil bølgeerosjonen virke over lengre tid. Videre kan vannstandsvariasjonene brekke ned eller bryte opp is som allerede har lagt seg. Isen vil ofte være fastfrosset i erosjonshud eller vegetasjon og kan dermed rive dette med seg og gi sår.

Sedimenttype

Figur **A-3** (Hjulstrøms diagram) viser sammenhengen mellom korndiameter og vannstrømmens middelhastighet, og hvilke eksogene geologiske prosesser som vil skje.

Ved utfelling av masser fra vannstrømmen (sedimentering) er det lineær sammenheng mellom vannhastighet og størrelse på sediment som felles ut. Ved erosjon er det et minimumspunkt ved finsand. Finere masser er mindre eroderbare pga. kohesjon i massene. Grovere masser blir som ventet mindre eroderbare med økende korndiameter og friksjonsmasser.



Figur A-3. Hjulstrøms diagram.

Diagrammet kan ikke direkte overføres til løsmassene i de aktuelle områdene hvor sedimentene vanligvis har variabel kornsammensetning. For mer ensgraderte sedimenter vil det for den lett eroderbare grovsilt-sand fraksjonen (0,02-2 mm) foregå erosjon allerede ved hastigheter fra ca. 0,2 m/s. Grus eroderer ved hastigheter 0,5 - 1,0 m/s. Grov sams masse kan gi erosjonsbeskyttelse for hastigheter opp til 3-5 m/s.

Transport av løsrevet finfrakjsonert materiale finner imidlertid sted helt ned til hastigheter på 0,001 m/s.

Det bør påpekes at vannstrøm fra propeller m.v. (menneskelig aktivitet) som regel gir langt større vannhastighet enn normalt for elven og kan forårsake omfattende erosjon i finkorninge masser.

Bølgeerosjon

Bølgehøyden er bestemmende for bølgenes erosjonsevne. Bølgehøyden er avhengig av magasinets lengde og bredde, vindhastighet og varighet samt gjennomsnittlig vanndybde i magasinet.

I rennende vann vil bølgene bøyes av og dempes. Vegetasjon og topografiske forhold sammen med vannflatenes svært begrensende omfang, medfører at bølgeerosjon langs en elv er meget beskjeden.

Etter regulering i et magasin vil det etableres nye strandsoner som strekker seg fra LRV til noe over HRV. Inntil nye strandsoner er etablert, vil bølgeerosjon være aktiv på de områder som tidligere bare har vært utsatt for overflatevannets erosjon.

Det er forskjell på bølger generert av vind og båter. Vanligvis vil bølgene fra båter være krappere og høyere, men færre. I enkelte tilfeller kan båtbølger gjøre mer skade enn vindbølger.

Is og tele

I magasiner vil isingen gi et generelt bidrag til strandlinjedannelsen på nivå for vintervannstand i form av skuring og plukking av løsmasser. Nedtapping av magasiner vil også bidra med nedbrekking av isen og nedtrekking av løsmasser.

Endrede grunnvannstander og magasinnivåer gir forandringer i omfang av områder eksponert for teledanning. Erosjonen vil særlig skje i form av små ras i skråninger uten vegetasjonsdekke når telen om våren går ut av jorda.

Unormal høy vannhastighet og varierende vannivå som skyldes regulering eller effektkjøring bidrar til at en eventuell isdannelse skjer senere enn normalt eller uteblir. Derved forlenges eksponeringen av strandsonene til erosjonen fra andre faktorer.

Mengde og størrelse av partikler som transporteres i elvevannet

Partikler som transporteres i vannet kan slå løs korn på elvebunnen slik at de lettere frigjøres og føres bort. Omfanget av denne erosjonen er proporsjonal med mengde og størrelse av partiklene i vannet. I flomperioder vil elver pga. høyere vannhastighet kunne føre betydelige mengder løsmasser i elvevannet. De partiklene som en elv fører med seg vil da øke elvens erosjonsevne ytterligere.

Ved normalvannføring vil denne erosjonen være ubetydelig da massetransporten i elvene er liten. Også i flomsituasjoner vil denne type erosjon være av mindre betydning, selv om partikkeltransporten vil øke i enkelte elvestrekninger på grunn av økt vannføring etter utbyggingen.

A.1.2. På landsiden

Menneskelig aktivitet

Aktiviteter som kan påvirke erosjonsforholdene er:

- Båtaktivitet som gir bølger og propellstrøm.
- Utfyllinger og tiltak som forandrer vannets naturlige strømming (som uttak av grus) og som dermed vil endre erosjonsforholdene ved og nedstrøms tiltaket.
- Økt massetransport ut i magasinet som kan endre bunntverrsnitt og forløp som igjen endrer vannstrømmen. Jordbruk, skogsavvirkning o.l. kan bidra til dette.

Flere av faktorene er beskrevet foran under kapitlet "Andre faktorers innvirkning på stabiliteten" og kommenteres kun kort i det følgende.

Nedbør og overflatevann

Dette er viktig som kilde til grunnvann. Mye og lang tids nedbør vil heve grunnvanstanden som er ugunstig da det øker grunnvannstrømmen ut av et profil.

Nedbør og overflatevann bidrar til overflaterosjonen og massetransport ut i vannveien. Kombinert med andre faktorer bidrar de også til ravinedannelse.

Grunnvann og gradient

I regnværsperioder og spesielt under snøsmelting vil grunnvannspeilet kunne bygge seg opp til terrengnivå. Grunnvannet vil strømme gjennom løsmassene ut mot vannets frie overflate.

Denne vannstrømmen er avhengig av gradient og av permeabiliteten i massene. Vannstrømmen vil øve et trykk på kornene i løsmassene i skråningene.

Det er denne grunnvannstrømmen ut gjennom en skråning som er en av de viktigste faktorene til økt erosjon. Stor grunnvannstrøm kan føre til "piping", dvs. at kornene i løsmassens overflate rives med av grunnvannstrømmen og det dannes kanaler og rørlignende hulrom inne i massen. Grunnvannstrømmen belaster jordpartiklene generelt med en utadrettet kraft slik at partiklenes forankring i skråningen er redusert. Derved skal det mindre skjærkraft til fra det strømmende vannet i vannveien for å rive partiklene med seg.

Ved regulering blir vannstanden hevet og senket. Senkningen vil gi økt gradient og økt erosjon. Ut fra lokale løsmasseforhold kan denne effekten inntre langs hele bunntverrsnittet. "Usynlig" økt erosjon med undergraving av tverrsnittet på dypt vann kan bli et resultat.

Markfuktighet

Markfuktigheten påvirker erosjonen i den grad fuktigheten binder eller løser mineralkornene.

Løsmasseprofil og sedimenttyper

Erosjonshastigheten er avhengig av sedimenttypen som nevnt. Løsmasseprofilet er også viktig især ved lagdelte masser. Lagdeling kan være årsak til at erosjonsstabile masser brekkes ned og transporteres bort. Ethvert vassdrag vil ha sine karakteristiske løsmasseprofiler som vil variere fra sted til sted. For å kunne forstå, analysere og eventuelt forebygge erosjon er det nødvendig med kartlegging av løsmasseprofilene.

Frost, tele, is

Frostnedtrenging påvirkes bl.a. vegetasjonen og reduseres vanligvis med tett vegetasjon som binder løs snø.

Teledannelse påvirkes i samme grad som grunnvann og markfuktighet påvirkes.

Is bygges opp som resultat av overflatevannsig og grunnvannstrøm ut i skråninger over vannspeilet i vassdraget ved temperaturer under null.

Effektkjøring kan påvirke alle disse tre faktorene, men virkningen er normalt meget liten.

Vegetasjon

Som nevnt tidligere reduserer vegetasjon erosjonen ved sitt rotnettverk. Hvis vegetasjonen blir revet opp er erosjonen lokalt som regel meget stor. Dette skjer oftest under stor flombelastning fra høy vannhastighet.

Vegetasjonsmotstanden er avhengig av tiden belastningen virker. En mindre flom over lengre tid kan ødelegge mer vegetasjon og derved forårsake mer erosjon enn en større flom over kortere tid. Når det gjelder vurdering av erosjonsskader burde derfor gjentaksintervall både for flommens størrelse og varighet fastlegges.

Solifluksjon og naturlige bevegelser i skråninger

Prosessene påvirker erosjonen i den grad de er med på å ødelegge vegetasjonsdekket, lage sprekker for tilgang på vann og løsne masser som senere kan eroderes vekk.

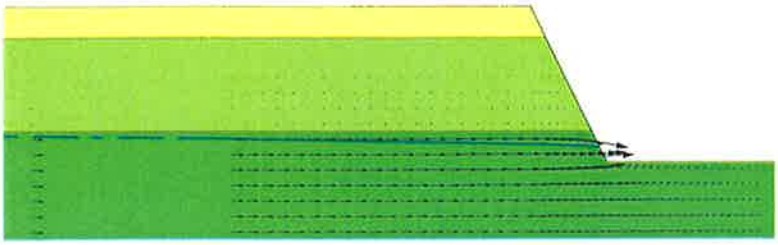
Menneskelig aktivitet

Aktiviteter som kan påvirke både erosjon og stabilitet er som nevnt:

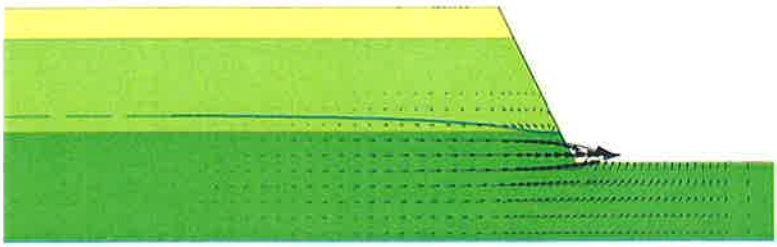
jordbruk ved endring av overflatevannsavrenning og økt overflateerosjon
bygge- og anleggsvirksomhet ved endring av overflatevannsavrenning og grunnvann
bruk av grunnvann ved pumping o.l. som vil senke grunnvannsspeilet
miljøendringer som endring av vegetasjon, flatehugst, avrenning og utslippp fra bebyggelse og industri

Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret kornfordeling (simulering 2) og høy skråning (simulering 3)

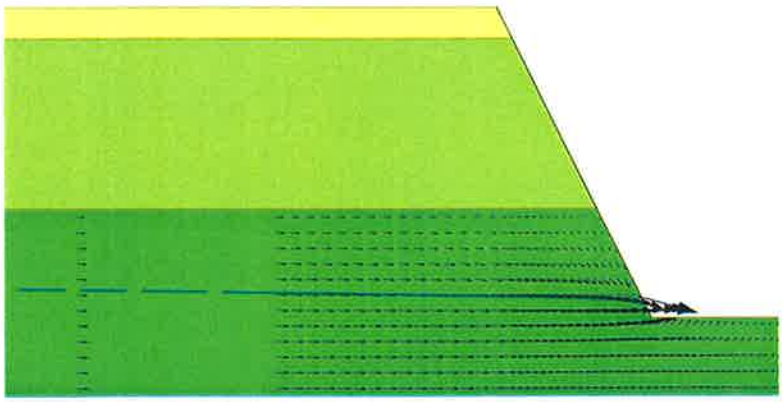
Parameter	Simulering 1	Simulering 2	Simulering 3
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Finkornige masser	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret	Høy skråning
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	Uendret	Uendret



Simulering 1. - Utgangsmodell



Simulering 2. - Finkornige masser (V x 1000)

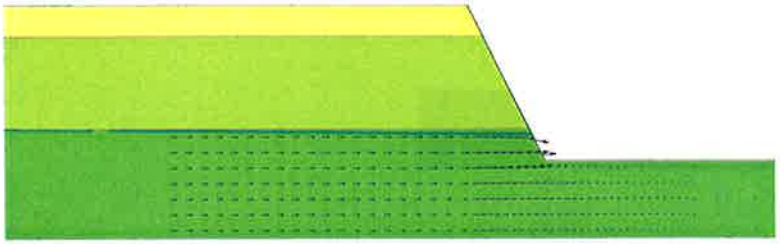


Simulering 3. - Høy skråning (4m)

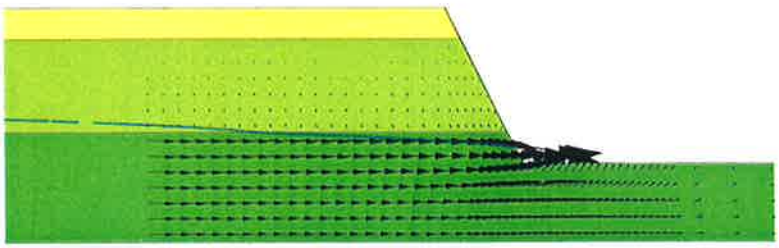
Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret vannstandsvariasjon (simulering 4 og 5)

Parameter	Simulering 1	Simulering 4	Simulering 5
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uke	5 timer
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	Uendret	Uendret

Simulering 1. **Vannstandsvariasjon over et døgn (ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer)**



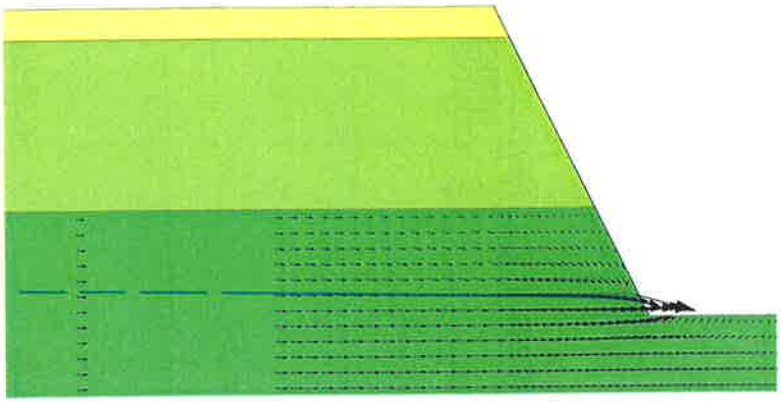
Simulering 4. **Vannstandsvariasjon over en uke (0,67 m ned over 5 døgn, 0,67 m opp over 2 døgn)**
Middelvannstand = 0,7 m dybde
Lavest mulig vannstand = 0,33 m dybde



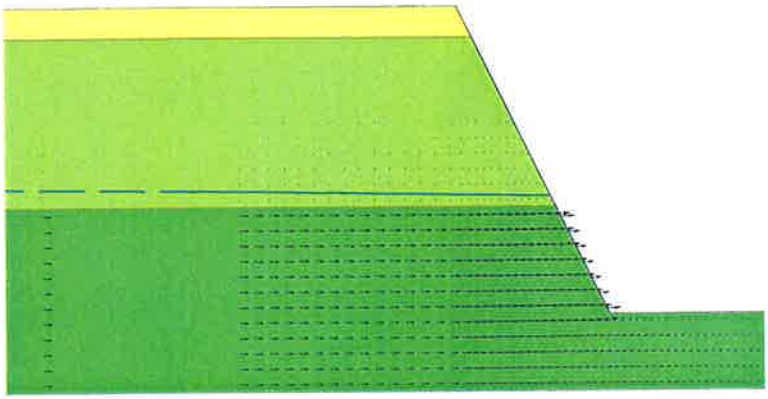
Simulering 5. **Vannstandsvariasjon over 5 timer (ned 0,8 på 0,5 time, stabilt i 4 timer, opp 0,8 m på 0,5 time, stabilt 19 timer)**
Middelvannstand = 0,9 m dybde

Simulering 3 sammenlignet med endret initialvannstand, simulering 6 og 7

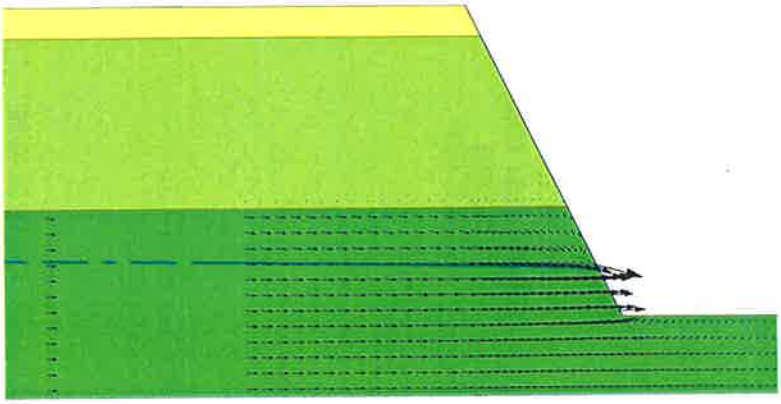
Parameter	Simulering 3	Simulering 6	Simulering 7
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Uendret
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	2,3 m dybde	1,4 m dybde
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6m dybde	Uendret	Uendret



Simulering 3.



Simulering 6. - Initialvannstand = 2,3 m dybde, Middelvannstand = 1,9 m dybde

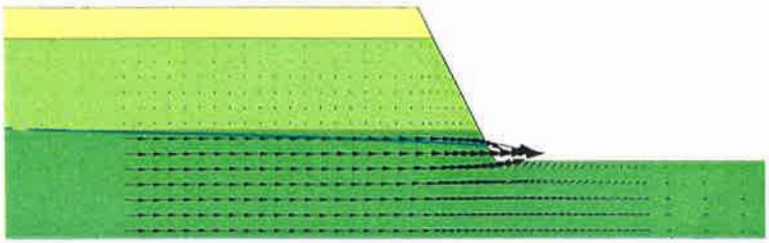


Simulering 7. - Initialvannstand = 1,4 m dybde. Middelvannstand = 1,0 m dybde

Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret grunnvannstand (simulering 8)

Parameter	Simulering 1	Simulering 8
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	1,1 m dybde

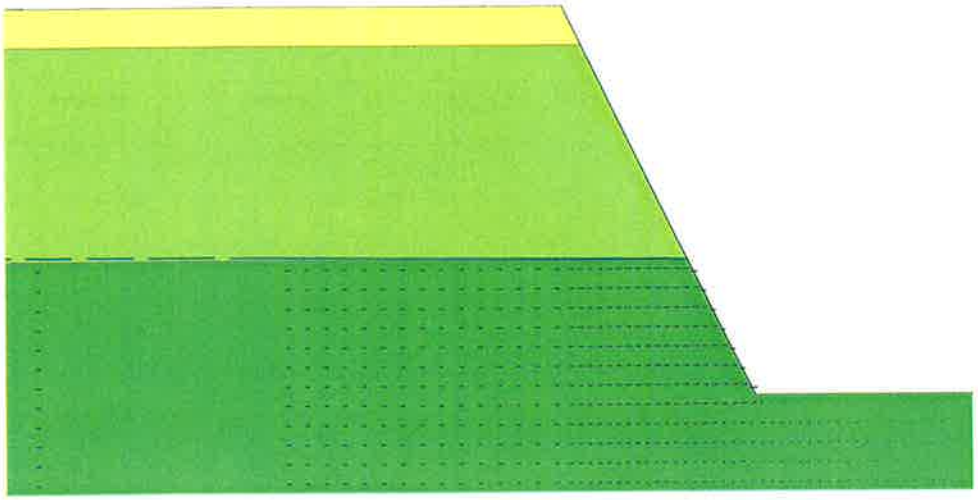
Simulering 1.



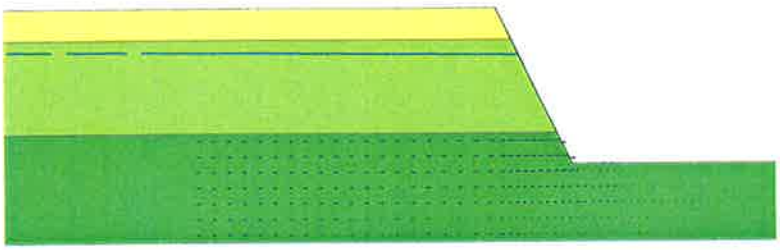
Simulering 8. - Grunnvannstand = 1,1 m dybde

Simulering 10 sammenlignet med endret skråningshøyde/initialvannstand (simulering 9) og endret kornfordeling (simulering 11)

Parameter	Simulering 10	Simulering 9	Simulering 11
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Finkornige løsmasser
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Lav skråning	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	1,4 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Stasjonær	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 1,9 m dybde	Uendret	Uendret

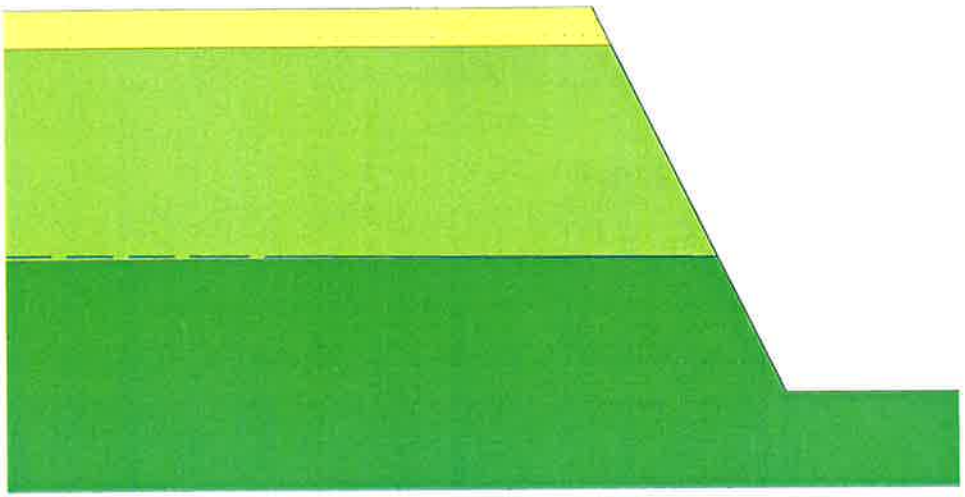


Simulering 10. Stasjonær tilstand



Simulering 9. - Stasjonær tilstand

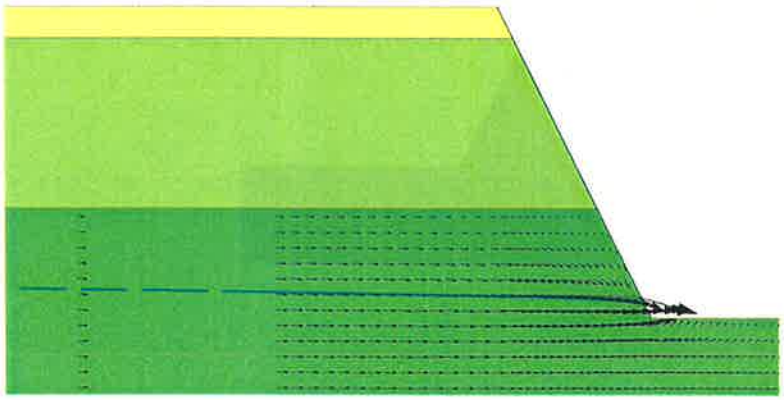
Initialvannstand/vannstand = 1,4 m dybde
Grunnvannstand = 1,9 m dybde



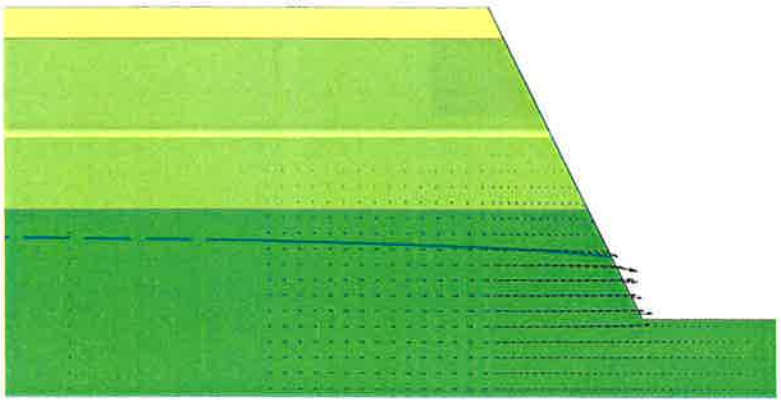
Simulering 11. - Stasjonær tilstand, finkornige masser (V x 1000)

Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser/annen vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)

Parameter	Simulering 3	Simulering 12	Simulering 13	Simulering 14
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Finkornige masser	Finkornige masser, høy K-verdi i lag 3	Finkornige masser
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Uendret	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	1,4 m dybde	1,4 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uke	Uke	5 timer
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6m dybde	Uendret	Uendret	Uendret

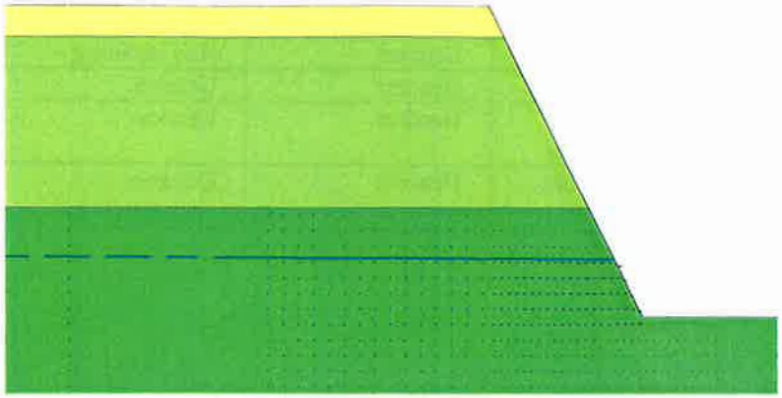


Simulering 3.

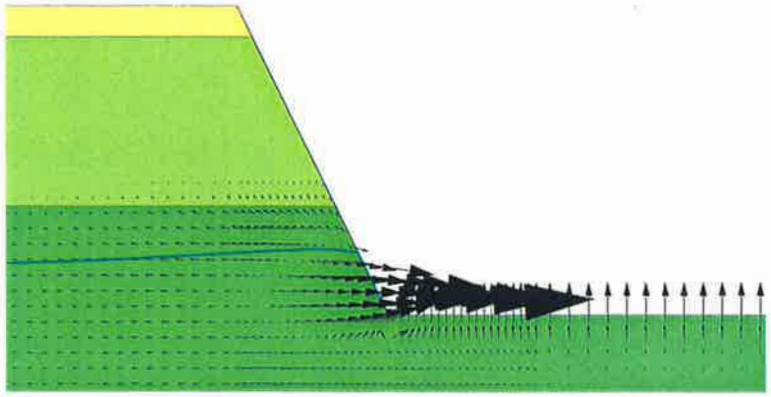


Simulering 12. - Finkornige masser (V x 1000)

forts, Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser/annen vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)



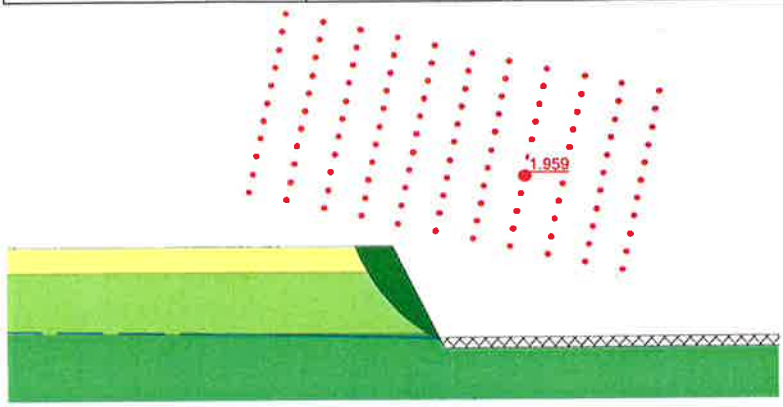
Simulering 13. - Finkornige masser men med grovt 3'dje lag



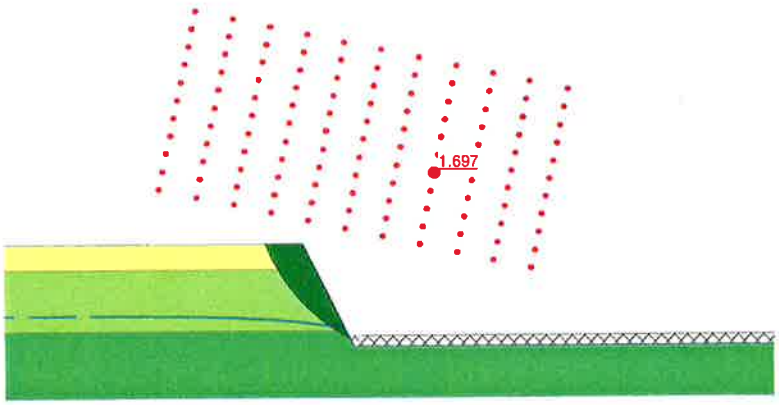
Simulering 14. Finkornige masser (V x 1000) - vannstandsendring over 5 timer

Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret kornfordeling (simulering 2) og høy skråning (simulering 3)

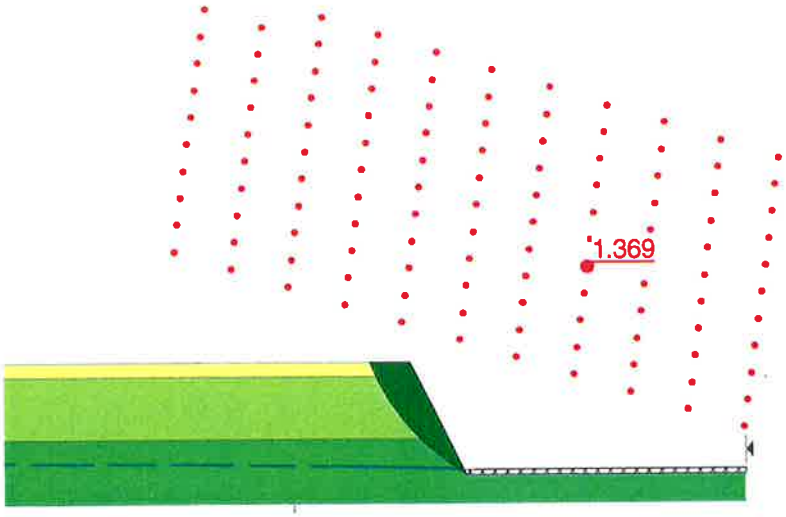
Parameter	Simulering 1	Simulering 2	Simulering 3
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Finkornige masser	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret	Høy skråning
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	Uendret	Uendret



Simulering 1. (1,96)



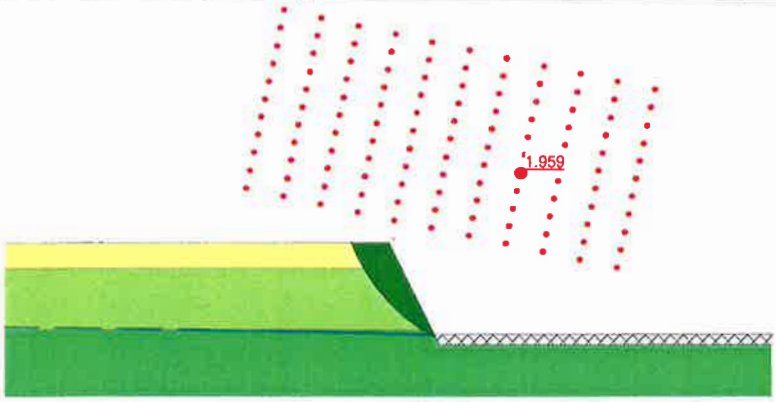
Simulering 2. - Finkornige masser (1,70)



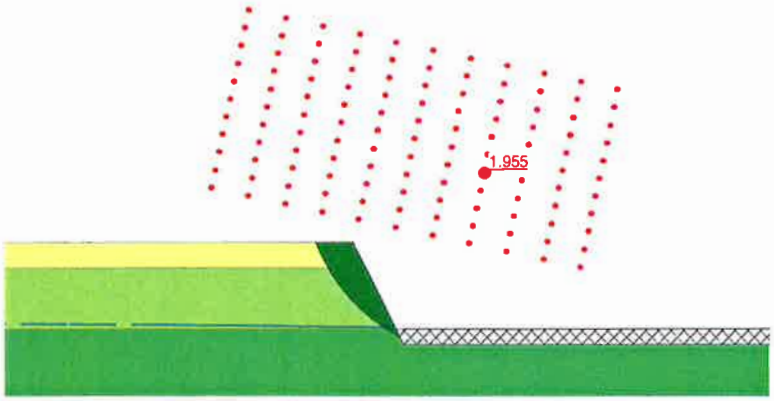
Simulering 3. - Høy skråning (4m) (1,37)

Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med ny vannstandsvariasjon (simulering 4 og 5)

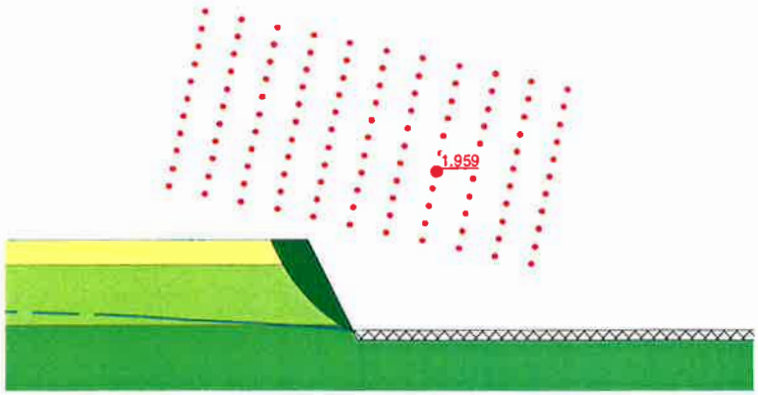
Parameter	Simulering 1	Simulering 4	Simulering 5
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uke	5 timer
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	Uendret	Uendret



Simulering 1. Vannstandsvariasjon over et døgn (1,96)



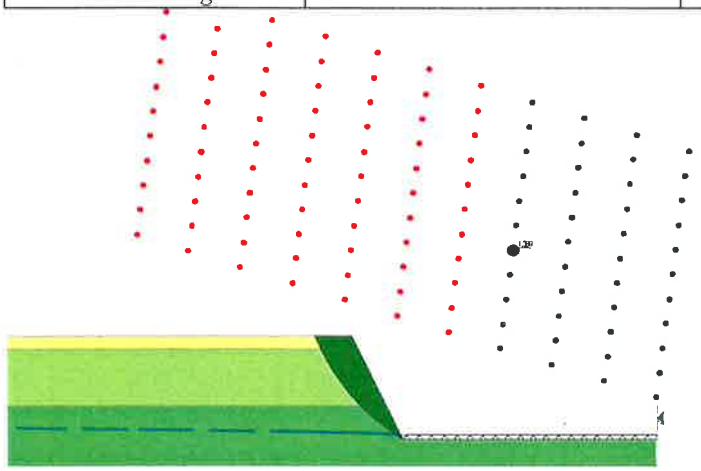
Simulering 4. Vannstandsvariasjon over en uke (0,67 m ned over 5 døgn, 0,67 m opp over 2 døgn) (1,96)
Middelvannstand i elven = 0,7 m dybde
Lavest mulig vannstand = 0,33 m dybde



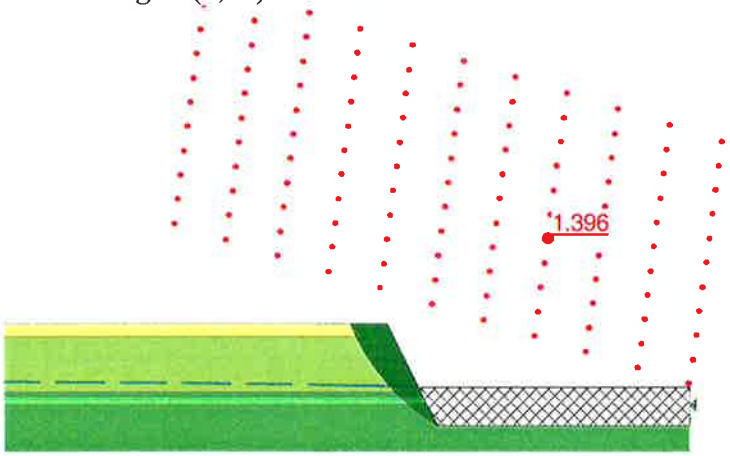
Simulering 5. Vannstandsvariasjon over 5 timer (ned 0,8 på 0,5 time, stabilt i 4 timer, ned 0,8 m på 0,5 time, stabilt 19 timer) Middelvannstand i elven = 0,9 m dybde **(1,96)**

Simulering 3 sammenlignet med endret initialvannstand, simulering 6 og 7

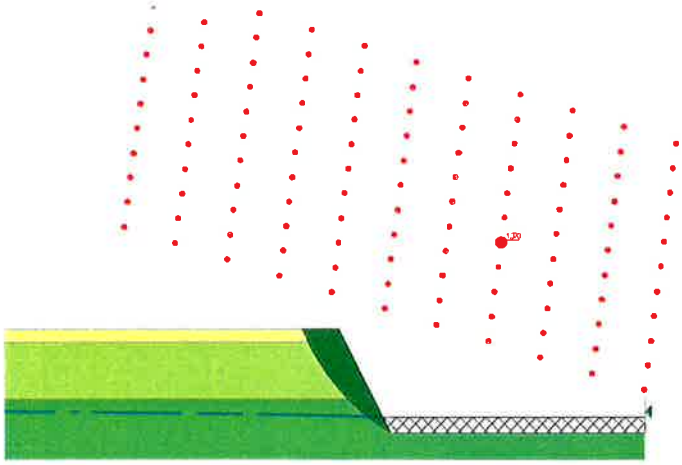
Parameter	Simulering 3	Simulering 6	Simulering 7
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Uendret
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	2,3 m dybde	1,4 m dybde
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6m dybde	Uendret	Uendret



Simulering 3. (1,37)



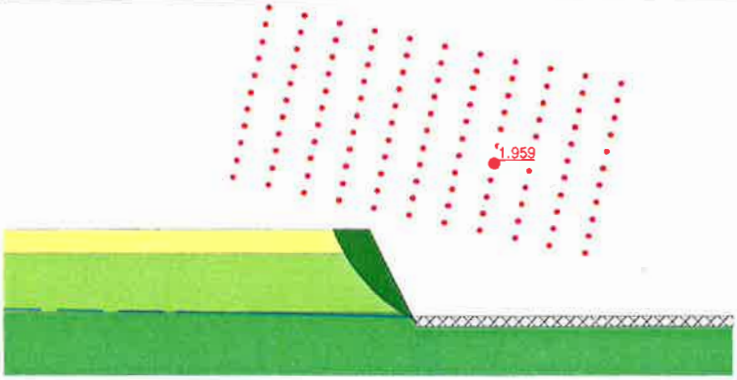
Simulering 6. - Initialvannstand = 0,5 m dybde, Middelvannstand i elven = 0,1 m dybde **(1,40)**



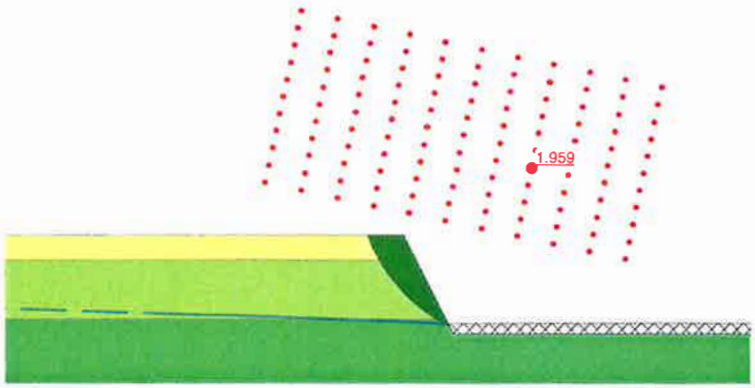
Simulering 7. - Initialvannstand = 1,4 m dybde Middelvannstand i elven = 1,0 m dybde **(1,37)**

Utgangsmodell (simulering 1) sammenlignet med endret grunnvannstand (simulering 8)

Parameter	Simulering 1	Simulering 8
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret
Skråningshøyde (H)	Lav skråning	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6 m dybde	1,1 m dybde



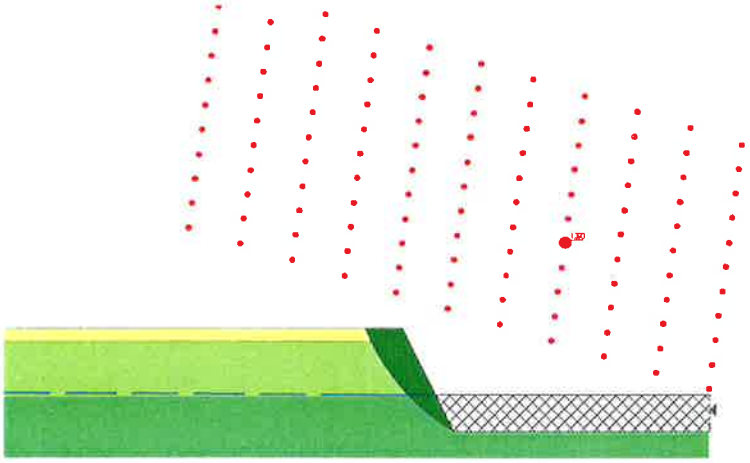
Simulering 1. (1,96)



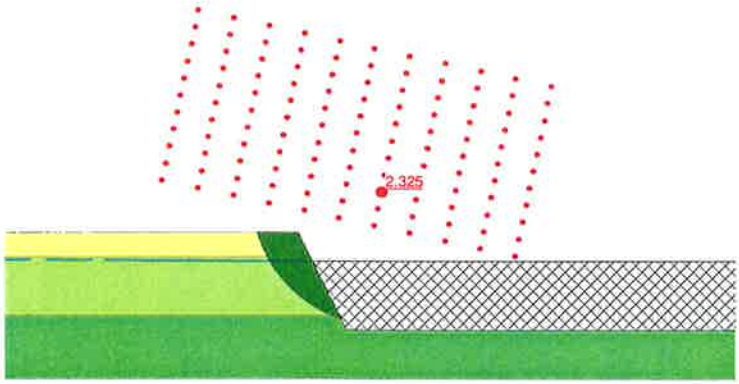
Simulering 8. - Grunnvannstand = 1,1 m dybde (1,96)

Simulering 10 sammenlignet med endret skråningshøyde/initialvannstand (simulering 9) og endret kornfordeling (simulering 11)

Parameter	Simulering 10	Simulering 9	Simulering 11
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Uendret	Finkornige løsmasser
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Lav skråning	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	1,4 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Stasjonær	Uendret	Uendret
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 1,9 m dybde	Uendret	Uendret

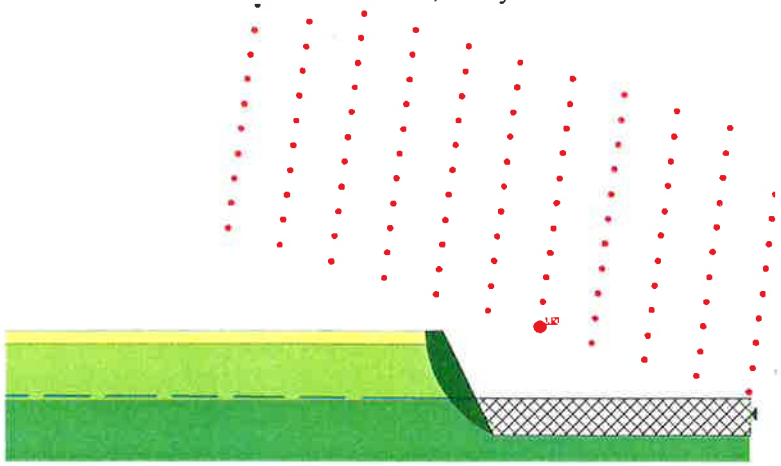


Simulering 10. Stasjonær tilstand (1,39)



Simulering 9. - Stasjonær tilstand (2,33)

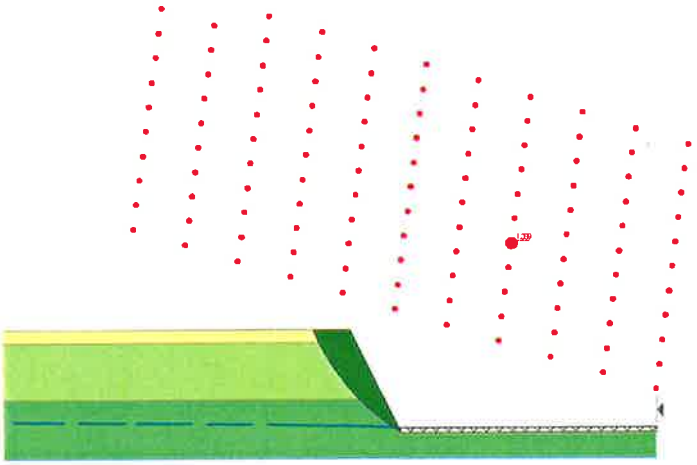
Initialvannstand/vannstand i elven = 1,4 m dybde
Grunnvannstand = 1,9 m dybde



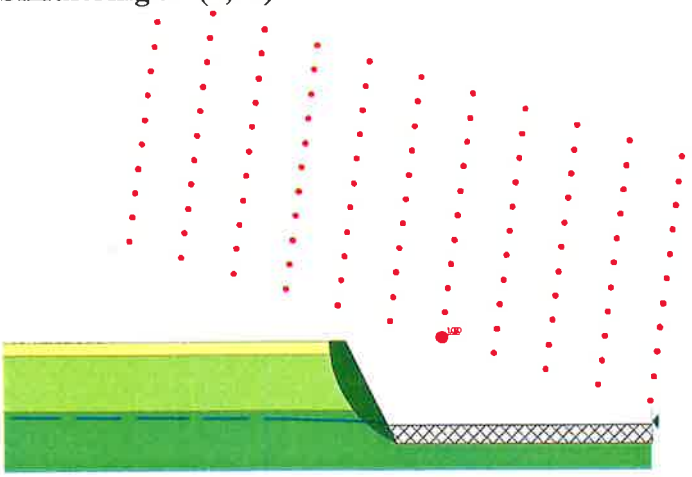
Simulering 11. - Stasjonær tilstand, finkornige masser (1,12)

Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser/annen vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)

Parameter	Simulering 3	Simulering 12	Simulering 13	Simulering 14
Kornfordeling	Middels grove løsmasser	Finkornige masser	Finkornige masser, høy K-verdi i lag 3	Finkornige masser
Skråningshøyde (H)	Høy skråning	Uendret	Uendret	Uendret
Initialvannstand	1,0 m dybde	1,4 m dybde	1,4 m dybde	Uendret
Vannstandsendring	Døgn; ned 0,8 m over 12 timer, deretter opp 0,8 m over 12 timer	Uke	Uke	5 timer
Grunnvannstand 90 meter fra skråning	Middelvannstand = 0,6m dybde	Uendret	Uendret	Uendret

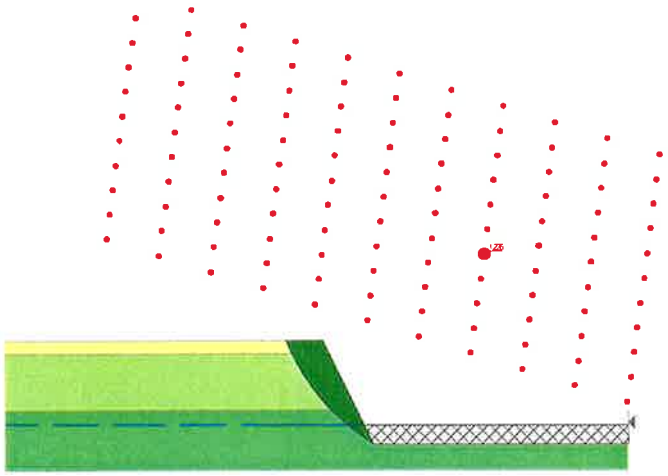


Simulering 3. (1,37)

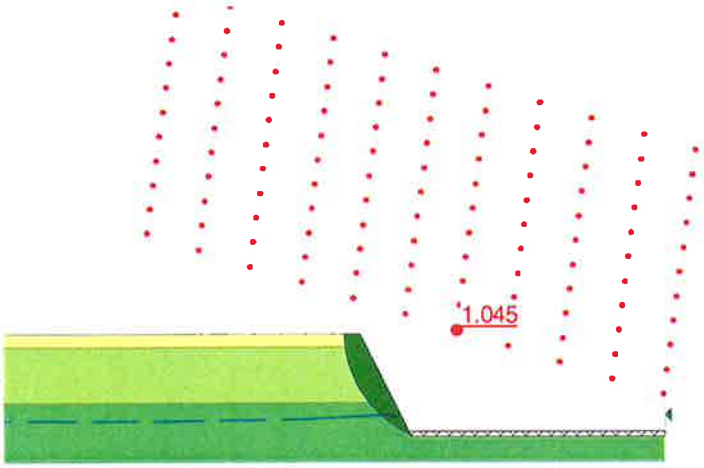


Simulering 12. - Finkornige masser (1,08)

forts, Simulering 3 sammenlignet med finkornige masser/annen vannstandsendring (simulering 12, 13 og 14)



Simulering 13. - Finkornige masser men med grovt 3, lag (1,23)



Simulering 14. Finkornige masser - vannstandsendring over 5 timer (1,05)

Rapporter utgitt i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak:

1. Analyse av frostrøykobservasjonar vinteren 1996/97 over Bandak og Våmarvatnet i Tokkevassdraget.

2. Forsøkskjøring i Vinjevatn september 1997 – virkninger på fysiske og biologiske forhold – foreløpige resultater

3. Innsamling og systematisering av erfaringsdata

4. Effektregulering – turbiditetsøkning og biologiske virkninger i sjø

5. Effektregulering – virkninger på laksefisk og bunndyr i elv, og bruk av vassdragssimulatorens habitatmodell

6. Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak

7. Prøvekjøring i Vinjevatn august/september 1998 Virkninger på fysisk og biologiske forhold – foreløpige resultater

8. Effektregulering – virkninger på bunndyr og plankton i Vinjevatn

9. Effektregulering – ferskvannsinnblanding i fjorder og algevekst

10. Frostrøyk ved Våmarvatnet i Tokkevassdraget vintrane 1996/97 – 1998/99.

11. Effektregulering- virkninger på vannvegetasjon av prøvekjøringene i Vinjevatn 1997 og 1998.

12. Effektregulering og grunnvannserosjon – analyser og tiltak.

EnFO

NVE

DIREKTORATET FOR
NATURFORVALTNING

Statkraft