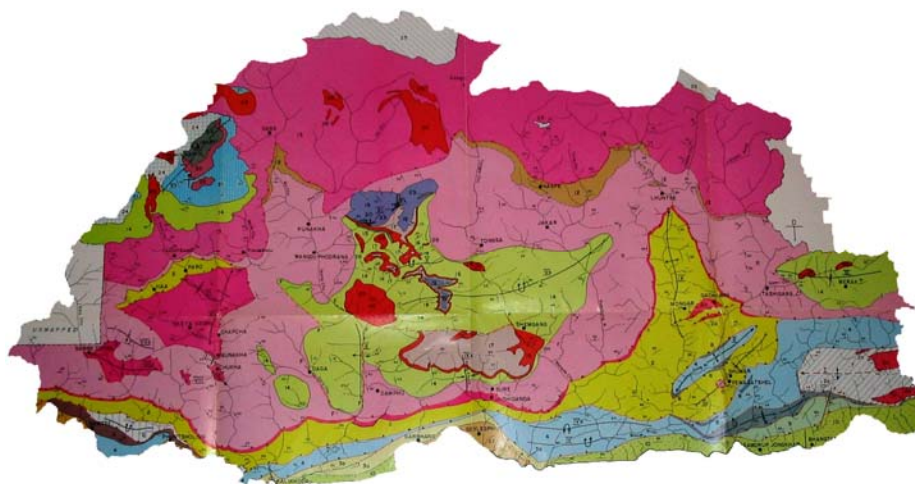


Masteroppgave i geofag

Stabilitetsanalyser og forebyggende tiltak mot skred i Bhutan

Sam Eidsheim



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Stabilitetsanalyser og forebyggende tiltak mot skred i Bhutan

Sam Eidsheim



Masteroppgave i geofag
Studieretning: Miljøgeologi og naturkatastrofer

Institutt for geofag
Matematisk-naturvitenskaplig fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

Juni 2005

© **Sam Eidsheim, 2005**

Veiledere: Prof. Kaare Høeg, UiO

Dr. Rajinder Bhasin, NGI

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

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

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Sammendrag

Bhutans geologi er preget av Himalaya-regionens karakteristiske skyveforkastninger og høye relieff. Den røffe topografien styrer de klimatiske. Bhutan har tropisk klima i sør og kaldere klima i nord. Kraftig forvitring av berggrunnen kombinert med alpine terrengformer gjør landet planleggingsmessig vanskelig for ingeniørgeologer. Skredsituasjonen i Bhutan er preget av hyppige utrasninger langs bratte fjellskråninger, skred utløst i perioder med kraftig nedbør og skred utløst i forbindelse med veiskjæringer langs fjellsidene. Landets beliggenhet innenfor en region med høy seismisk aktivitet står også i disfavør for stabiliteten av fjellskråningene. Kharbandi-skredet er én av tre større utrasninger som har gått langs hovedveien mellom Thimpu og Phuentsholing. Skredet er mer enn 15 år gammelt og ligger i en forvitret fyllittformasjon. Skjærstyrken og kornstørrelsen i dette materialet er klassifisert som løsmasser. Stabilitetsanalyser av skråningen gir lave sikkerhetsfaktorer helt ned mot 1. Skredet er idag et erosjonsskred med en retrogressiv skredmekanisme. Muligheten for dypere utrasninger er absolutt til stede da store variasjoner i nedbørsmengde endrer poretrykkene og grunnvannsnivået signifikant. Regneprogrammene Slide og Slope/W ble benyttet på skråningen, og deretter sammenlignet med hverandre både regnemessig og med hensyn til brukervennlighet. I utgangspunktet skulle også regneprogrammet Phase² benyttes, men det viste seg umulig å anvende programmet på denne typen problemer. Phase² er kun for bergrom. Bishop-metoden ble benyttet i beregningene og resulterte i generelt høyere sikkerhetsfaktorer i Slope/W sammenlignet med Slide. I brukervennlighet er Slide det lettest anvendelige regneprogrammet. Sikringstiltakene i Kharbandi-skredet bør bygge videre på de tiltak som allerede er igang, og i tillegg anbefales dreneringskonstruksjoner på overflaten og ev. inne i skråningen.

Forord

Denne oppgaven er en del av et masterprogram ved Institutt for Geofag, Universitete i Oslo.

Hovedveileder har vært Prof. Kaare Høeg og oppgaven er gitt av Dr. Rajinder Bhasin, ved Norges Geotekniske Institutt (NGI), som i tillegg har vært biveileder.

Jeg vil takke mine veiledere for kontakten vi har hatt under oppgaven og samtidig rekke en takk til alle medstudentene i masterprogrammet for Miljøgeologi og Naturkatastrofer.

Oslo, juni 2005

Sam Eidsheim

Innholdsfortegnelse

	Sammendrag	_____	i
	Forord	_____	ii
	Innledning og formål	_____	3
1	Bhutans geologi	_____	4
	1.1 Geologisk oversikt	.....	4
	1.2 Ingeniørgeologiske forhold	.....	6
	1.3 Skredsituasjonen	.....	6
2	Kharbandi-skredet	_____	7
	2.1 Tidligere studier av Kharbandi-skredet	.....	8
	2.1.1 Innsamlede data	.....	10
3	Metoder for stabilitetsanalyser	_____	13
	3.1 Bruken av forskjellige regneprogrammer	.....	13
	3.1.1 Slide v4.0	.....	13
	3.1.2 Phase ² v5.0	.....	14
	3.1.3 Slope/W v5.19	.....	15
4	Resultater av stabilitetsanalysene	_____	16
	4.1 Beregning av sikkerhetsfaktorer	.....	16
	4.1.1 Reduksjon av destabiliserende krefter	.....	19
	4.1.2 Økning av stabiliserende krefter	.....	21
	4.1.3 Effekten av destabiliserende krefter	.....	22
5	Diskusjon av resultater og usikkerheter	_____	24
	5.1 Sikkerhetsfaktorer beregnet innenfor samme regneprogram	.....	24
	5.1.1 Sikkerhetsfaktorer fra Slide og Slope/W	.....	24
	5.2 Brukervennlighet av regneprogrammene	.....	25
	5.3 Usikkerhetsfaktorer	.....	26
	5.3.1 Regneprogrammer	.....	26
	5.3.2 Kart og profil	.....	26
	5.3.3 Innsamlede data	.....	26

6	Forslag til sikringstiltak _____	27
6.1	Kharbandi-skredet	27
6.2	Bhutan generelt	28
7	Konklusjoner og anbefalinger _____	29
8	Referanser _____	30

Vedlegg A Representative figurer fra stabilitetsanalysene

Innledning og formål

Bhutan er et lite kongedømme plassert mellom Kina og India i Himalayafjellkjeden. Alpint terreng, varierende klima og kraftig forvitrede bergarter gjør Bhutan til et land eksponert for hyppige utløsninger av skred. De få, men svært viktige hovedveiene som krysser landet er ofte utsatt for skader/ blokkeringer grunnet utrasninger langs fjellskråningene. Sikring og vedlikehold av disse veiene får stadig høyere prioritet fra ingeniørgeologer.

Hovedformålet med oppgaven var å utføre stabilitetsanalyser på et skred i Kharbandi, nær byen Phuentsholing, og se på alternativer for ytterligere stabilisering av skredet.

Skredsituasjonen generelt i Bhutan skulle også tas i betraktning, og det skulle gis en kort innføring i Bhutans geologi og de ingeniørgeologiske forholdene.

Et annet formål med oppgaven var å evaluere regneprogrammene Slide, Phase² og Slope/W hver for seg og opp mot hverandre. Disse programmene skulle benyttes under stabilitetsanalysene av Kharbandi-skredet. Programmet Slide er ikke tidligere brukt i arbeider ved NGI.

1. Bhutans geologi

Bhutan er et lite land som ligger øst i Himalayafjellkjeden mellom Kina i nord og India i sør. Landet dekker et område på ca 46.500 kvadratkilometer med høyder fra 150 m. til 8000 m. over havnivå. Den røffe topografien er med på å styre de klimatiske forholdene i regionen. Generelt avtar nedbøren signifikant fra sør til nord, og mesteparten av landets nedbør faller i perioden Mai – September. Topografien i Bhutan gir tropisk klima på de sørlige slettene, kalde vintre og varme somre i innlandsdalene, og dårlige vintre og kalde somre i de nordlige delene av landet.

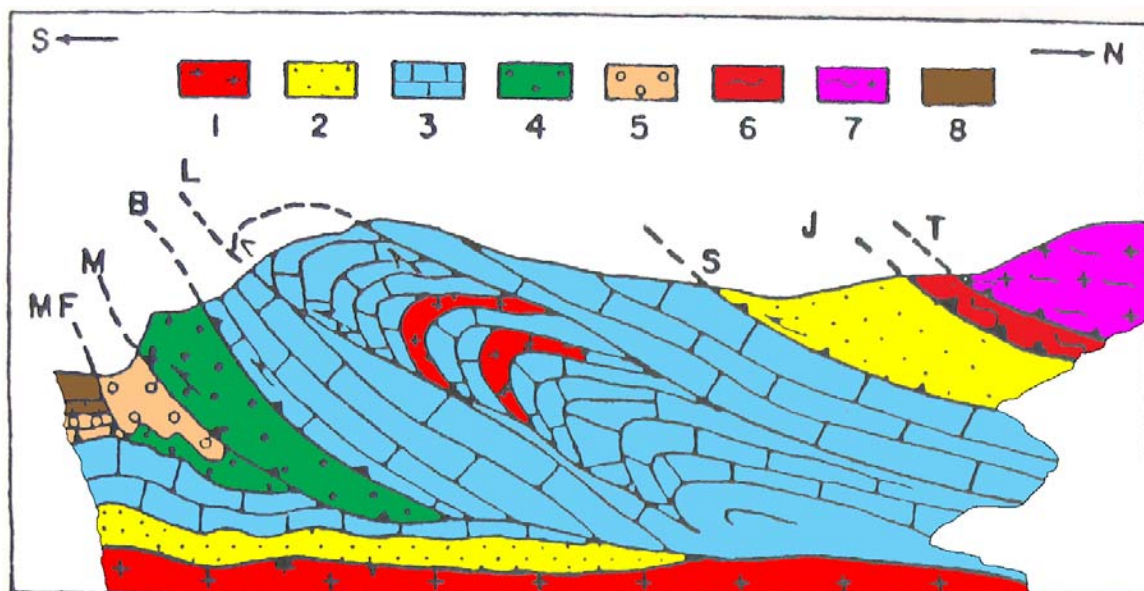
Befolkningen, estimert i 2004, er i overkant av 0,8 millioner. Landets økonomi er en av verdens minste, og baseres hovedsakelig på jordbruk og skogbruk. Vannkraftsektoren er den største inntekten som staten har. Smeltevann fra landets mange isbreer og høyt relieff gir svært gode betingelser for vannkraft.

1.1 Geologisk oversikt

Den regionalgeologiske settingen av det bhutanske Himalaya kan som andre sektorer av Himalaya deles inn i underdivisjoner av Siwalik Høydene, det lavere Himalaya og det høyere Himalaya, hvor topografien hovedsakelig kontrolleres av geologiske formasjoner (Bhargava, 1995). I Himalayafjellkjeden er det en nordvest-sørøst lineasjon som kan grovinndeles i tre skyvesoner: Main Frontal Thrust (MFT), Main Boundary Thrust (MBT) og Main Central Thrust (MCT), sistnevnte kalles også Thimpu Thrust. Fra grensen mot det indiske slettelandskapet i sør, ligger Siwalik-gruppen over de kvartære avsetningene, adskilt av MFT. Etter Siwalik-gruppen, følger MBT og en tykk pakke av lavere Himalaya-metasedimenter (Lesser Himalayan Sequence, LHS) som igjen adskilles, av MCT, fra det høyere Himalaya krystalline kompleks (Higher Himalayan Crystalline Complex, HHC). Rekkefølgen på LHS er som følger; Damuda Subgroup, Baxa Group, Diuri Formation, Shumar Formation and Jaishidanda Formation øverst. Over MCT ligger Thimpu-gruppen og Tethyan Succession. En oversikt over den tektonostratigrafiske oppbygningen av Bhutans geologi er vist i tabell 1.1, og figur 1.1 viser et skjematisk sør-nord-tverrsnitt av Bhutan. I tverrsnittet dipper lagene mot nord, hvilket er representativt for den geologiske lagdelingen i landet.

Tethyan Succession	Konglomerat, skifrig leirstein, siltstein, sandstein, kalkstein, vulkanske bergarter.
Inkonformitet	
Thimpu Group	Gneis, migmatitt, amfibolitt og høygrads metasedimenter.
Main Central Thrust (Thimpu Thrust)	
Jaishidanda Formation	Biotitt –granat+staurolittskifer med tektoniske strimler av granitt-gneis.
Jaishidanda Thrust	
Shumar Formation	Kvartsitt, fyllitt og kloritt-glimmerskifer, Barsong kalkstein, noen få tektoniske strimler av granitt-gneis i nedre del.
Shumar Thrust	
Diuri Formation	Diamiktitt, fyllitt, kvartsitt.
Inkonformitet? –lokalt tektonisert	
Baxa Group	Småsteinet feltspatkvartsitt, kalkstein, dolomitt, kvartsitt, konglomerat, leirskifer, kvartsitt, fyllitt, tektonisk skifrig leirstein fra Permian Setikhola Formation.
Baxa Thrust	
Damuda Subgroup	Sandstein, siltstein, skifrig leirstein, leire, kull-lag.
Main Boundary Thrust	
Siwalik Group	Sandstein, siltstein, skifrig leirstein, leire, konglomerat.
Main Frontal Thrust	
Quaternary Succession	Sand, konglomerat, silt, leire.

Tabell 1.1. Tektonostratigrafisk oppbygning av superposisjon i det bhutanske Himalaya. (kilde: Bhargava, 1995)



Figur 1.1. Skjematisk tverrsnitt av Bhutan med geologisk inndeling av de forskjellige skyvedekkenene. Forklaring: MF = Main Frontal Thrust, M = Main Boundary Thrust, B = Baxa Thrust, L = Leap frog forkastning, S = Shumar Thrust, J = Jaishidanda Thrust og T = Thimpu Thrust (MCT). 1. Grunnfjells-gneis, 2. Shumar Fm, 3. Baxa Gr, 4. Setikhola Fm, 5. Siwalik Gr, 6. Jaishidanda Fm, 7. Thimphu Gr, 8. Alluvium. (kilde: Bhargava, 1995)

1.2 Ingeniørgeologiske forhold

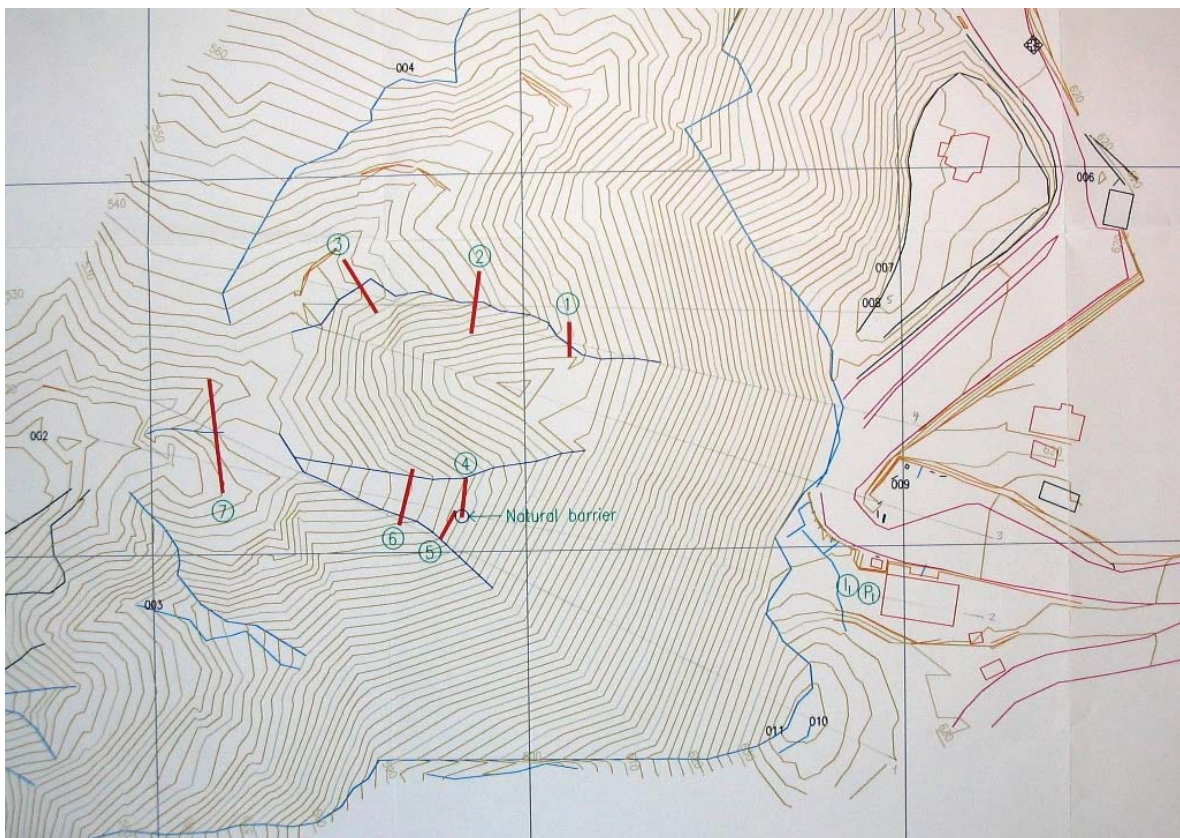
Planlegging for konstruksjoner, som bygg, demninger, voller, gruver, tunneller, veier osv, er en vanskelig utfordring for ingeniørgeologer i Bhutan. Det ustabile klimaet med kraftige regnskyll i monsun-månedene sammen med høy forvitnings- og ersjonsrate, forsterker vanskelige forhold som topografi og terrengformer. Landets geolgiske forhistorie, tektonikk som resulterte i Himalaya, har gjort det til en del av en større region ofte utsatt for naturkatastrofer. Områdene sør og øst i Bhutan er dominert av skred, ofte utløst i forbindelse med regnperiodene. Flere steder er berggrunnen nesten eller helt totalforvitret ned til titalls meter under overflaten. Prøveboringer, ved en kontrollpost i Phuentsholingned, har vist totalforvitret fjell helt ned til 40 meters dyp. Det bør her nevnes at forvitringen er sterkest og går dypest i disse sørlige delene av Bhutan. Bergartene, skifer, fyllitt og slamstein er også blant de minst motstandsdyktige mot forvitring. Mens de sørlige og østlige lavere liggende områdene er mest utsatt for skred, er nordlige Bhutan hovedsaklig eksponert for isbreer og deres assosierte naturkatastrofer. Hele områder i nord er dekket av is og snø, hvilket resulterer i breer som er kildene til elvene som renner fra nord til sør. Bare i Bhutan alene, er det 667 breer og 2674 bresjøer (Dorji et al., 2004). Selv om breene er enorme kilder vann, er de også potensielle katastrofer ved evt flodutbrudd fra bresjøene (Glacial Lake Outburst Floods). I alt er det 24 slike sjøer som er identifisert som potensielt farlige (Dorji et al., 2004).

1.3 Skredsituasjonen

Skredsituasjonen i Bhutan kjennetegnes både ved stadige utrasninger langs bratte fjellskråninger, især der hvor veiene skjærer langsmed fjellsidene, og ved alle skredene som utløses i perioder med kraftig nedbør. Skredaktiviteten er høyest i østre og sørlige områder av landet på grunn av det tropiske klimaet, det alpine terrenget og den høye graden av forvitrede bergmasser.

2. Kharbandi-skredet

Kharbandi-skredet er et forholdsvis gammelt skred (> 15 år) i forvitret phyllittisk bergarter nær kontrollposten i Phuentsholing (se figur 2.1). Skredet har nå blitt et erosjonsskred og hovedoppgaven er å kontrollere erosjonen i skredet. Skredet har forårsaket ødeleggelse på veien over skredet. Konstruksjonen av gabioner ble startet i 1999 for å kunne kontrollere erosjonen i skredet. I 2000 hadde monsunregnet negativ effekt på skredet siden det (regnvannet) aksellererte ødeleggelsene av veien, og gjorde sprekke i kontrollposten og i veggene ovenfor kontrollposten bredere. Det er rapportert at mange hundre millimeter regn falt kontinuerlig i løpet av noen dager i 2000. En ny vei er nå konstruert vekk fra kanten av skredet, hvor den tidligere eksisterende veien delvis har blitt ødelagt.



Figur 2.1. Oversikt over området i Kharbandi hvor skredet gikk. Røde linjer er planlagte gabioner (de er nå bygd). Lyseblå linjer er steder hvor det er observert strekk-sprekker. Mørkeblå linjer viser naturlige dreneringsveier. Rosa linjer er veien. P₁ og I₁ kontrollposte for henholdsvis inklinometer og piezometer.

2.1 Tidligere studier av Kharbandi-skredet

Tidligere studier og innsamlede data av Kharbandi-skredet er utgitt i to rapporter, Bhasin et al. (2003) og Bhasin et al. (2004). Her presenteres rapportenes beskrivelse av Kharbandi-skredet og undersøkelser fra stedet. Innsamlede og beregnede data presenteres i delkapittel 2.1.1.

2003-rapporten:

Bergarten er karbonholdig fyllitt med bånd av grønn klorittisk fyllitt med talk og sulfater. Materialet har egenskaper som løsmasse siden det er fullstendig forvitret og smadret og har veldig lav styrke og kohesjon. Forstyrrede prøver ble samlet fra stedet for å bestemme bergartens egenskaper, inkludert karakteristikk av dens skjærbruddstyrke. The Central Soil and Materials Research Station in New Dehli i India har utført laboratorietesting.

Kharbandi-skredet er et progressivt, utvidningsskred som domineres av erosjon.

Skredmekanismen er hovedsakelig forårsaket av en økning i poretrykket under regntiden, og skjærbruddstyrken reduseres. Mange dype sprekker på overflaten nær kontrollposten er blitt observert i skredet. Det er mulig at vann som filtreres inn i de dype sprekke fra overflaten kan forårsake en økning i hydrauliske trykk i sprekke (hydraulisk splitting). Dette resulterer i bergmassens bevegelse bak den bratte skråningen. Skredets bevegelse er en kombinasjon av flere mekanismer som plastisk strømming, skjærbrudd og strekking. Erosjonen i skredets rygger er forårsaket av kraftige regnskyll, og erosjonen i dreneringsløpene er hovedsakelig forårsaket av rennende vann. Graden av bevegelse i skredet avhenger av tilgangen til vann.

Konstruksjonen av gabioner skal fortsette for å øke skråningens naturlige friksjonsvinkel. I tillegg vil gabionene forhindre videre erosjon i bunnen av dreneringsløpene. Det vil etterhvert bli sådd frø til ny vegetasjon, og strekk-sprekkerene bak skredarret vil bli forseglet for å hindre vanntilførselen ned i sprekke. De mange dreneringene like ved kontrollpost skal forsegles med bitumen.

2004-rapporten:

Skredet har nå flyttet på seg. Status til strekk-sprekken i veggen rett ovenfor kontrollposten viser at noen av veggens elementer har forsvunnet i løpet av en måneders periode, og at sprekke har blitt bredere. Posisjonen og tilstanden til mangotreet bak veggen bør noteres. Flere centimeter brede strekk-sprekker vises ved veggen i bakken. Disse sprekke har tillatt

penetrasjon av vann inn til de dypere lagene av fjellgrunnen, som igjen har forårsaket bevegelse av skredet. I november 2003 ble noen av disse sprekkene tettet av personell fra NGI-DGM. Tetting av sprekker ble utført på følgende måte:

- Fjerning av løsmasser og torv på overflaten, over og rundt sprekkene.
- Fylling med løsmasser i de åpne sprekkene.
- Plassering av elastiskplastiske presenninger på overflaten.
- Minst 30 cm. overlapping på presenningene for å ta høyde for mulige bevegelser i bakken.
- Dekking av presenningene med løsmasser og organisk materiale.
- Planting av gress på overflaten for naturlig og estetisk utseende og for å hindre erosjonen av jord/løsmassene under regnfall.

I dreneringsløpene ble det foreslått at konstruksjonen av gabioner burde fortsettes for å øke naturlig friksjonsvinkel til skredet. The Department of Roads i Bhutan har tatt på seg ansvaret for å konstruere gabionene som ble avmarkert på et konturkart over Kharbandi-skredet.

Utslaget og distribusjonen av skredbevegelsen er generelt de viktigste avmålingene som kreves. I Kharbandiskredet er skredbevegelsene overvåket av et inklinometer. Skråningsindikator "Model 1000" inklinometersystem brukes til å måle lateral forflytning under overflaten. Ett borehull med en dybde på 40 m. ble drillet og logget. Tabell 2.4 viser den geologiske loggingen av hullet. Bergartene er mye til totalt forvitret. Bergertsformasjonen er dekket av grågul siltig sand med klaster av mørk grå, grønnaktig fyllitt og feltspatkvartsitt.

Ingen signifikant deformasjon er blitt observert siden inklinometeret ble installert etter monsunen i 2003.

Et piezometer er tatt i bruk for å lese av det hydrostatiske trykket. Hullet er 30 m. dypt og et porøst tube-piezometer er installert.

2.1.1 Innsamlede data

Innsamlede data fra Kharbandi-skredet gitt i de to rapportene fra Bhasin et al. (2003) og Bhasin et al. (2004).

2003-rapporten:

Mekaniske analyser						Atterberg Limits			Løsmasse- klassifika- sjon I.S.
.002	.002	.075	.425	2.0	7.75	-IS 425 micron sieve			
mm	til	til	til	til	mm					L.L	P.L	P.I
& mindre	.075 mm	.425 mm	2.0 mm	4.75 mm	& over				
4.6	14.2	27.1	40.2	6.9	7.0	19.5	N.P		SM Silty sand

Tabell 2.1. Resultater av mekaniske analyser og Atterberg Limit Tests.

Naturlig fuktighets- innhold %	Insitu tetthet γ_d (gm/cc)	Total skjærparameter		Effektiv skjærparameter		Spesifikk tyngde G
		c (kg/cm ²)	ϕ (grader)	c' (kg/cm ²)	ϕ' (grader)	
3.3	2.15	0.37	17.8	0.23	32.1	2.70

Tabell 2.2. Resultater av triaksial skjærtest. Denne tabellen er brukt i bergningene i kapittel 4.

2004-rapporten:

UCS	0.4 MPa
P-bølgehastighet	1.45 km/sek
S-bølgehastighet	1.08 km/sek

Tabell 2.3. Resultater fra et kubisk eksempel.

Depth			Litho-soil logged (m)	Recovery %	Lithological description
From (m)	To (m)	Run (m)			
0.00	1.17	1.17	0.75	64	Greyish yellow (orange) coloured silty sand with flakes of dark grey and greenish coloured phyllite. The clastic phyllite can be broken by hand and the material is mixed thoroughly in the ratio of (clastic:matrix) 1:4
1.17	1.80	0.63	0.63	100	-do- - but elastic in pebble size
1.80	2.30	0.5	0.09	100	Greyish yellow silty sand (powder core) having pebble size phyllite (fallen from above)
			0.41		Greyish brown/green, tabular sharp edged phyllite mixed with yellowish brown silty sand (powder core)
2.30	4.22	1.92	1.20	62.5	Interlayering of yellowish brown silty sand with greyish white coloured flaky phyllite. The phyllite is easily broken by hand
4.22	4.68	0.46	0.46	100	-do- (powder core)
4.68	5.02	0.34	0.34	100	-do- (clastic size ranges from 20 to 80 mm)
5.02	5.77	0.75	0.30	40	Interlayering of light yellow silty sand and highly weathered greyish white phyllite
5.77	6.16	0.39	0.39	100	Predominantly of yellowish brown silty sand with few pieces of highly weathered greyish phyllite
6.16	7.46	0.30	0.30	100	Yellowish brown silty sand with few greyish brown pebble to cobble size phyllite
7.46	7.56	0.10	0.10	100	Greyish brown silty sand with sharp edged, angular, flaky and pebble size greyish white phyllite
7.56	7.66	0.10	0.03	100	Reddish brown silty sand (powder core)
			0.07		Light yellow silty sand with few pieces of highly weathered greyish white phyllite
7.66	7.91	0.25	0.25	100	Yellowish brown silty sand with highly weathered greyish white phyllite
7.91	8.39	0.48	0.15	89	-do-
			0.28		Yellow brown silty Sand with few pieces of highly weathered feldspathetic quartzite
8.39	8.60	0.21	0.21	100	Yellowish brown silty sand with few pieces of green phyllite
8.60	8.80	0.20	0.20	100	Light yellow/brown silty sand with few pieces of green phyllite
8.80	9.01	0.21	0.21	100	-do-
9.01	9.10	0.09	0.09	100	-do-
9.10	9.35	0.25	0.25	100	-do- (sharp edged green phyllite)
9.35	9.48	0.13	0.13	100	Reddish brown silty sand with green coloured phyllite that are in pebble to gravel size having sharp edges
9.48	9.62	0.14	0.14	100	Sharp edged gravelly phyllite with silty sand
9.62	9.93	0.31	0.31	100	-do- powdered rock at the bottom
9.93	10.22	0.29	0.29	100	Yellowish coloured silty sand with moderately weathered phyllite having sharp edged, tabular and in pebble size
10.22	10.32	0.10	0.10	100	Dark grey/brown silty sand with pieces of dark grey phyllite having sharp edged and tabular in shape
10.32	10.48	0.16	0.16	100	-do-
10.48	10.65	0.17	0.05	100	-do-
			0.12		Dark grey moderately weathered and fractured phyllite with silty sand
10.65	10.86	0.21	0.21	100	Dark grey/brown silty sand with pieces of dark grey phyllite having sharp edges
10.86	10.96	0.10	0.10	100	-do- with few cobble size sharp edges phyllite present
10.96	11.06	0.10	0.10	100	-do-
11.06	11.26	0.20	0.20	100	-do-
11.26	11.46	0.20	0.10	50	-do-
11.46	11.54	0.08	0.08	100	-do-with more of dark grey sharp edges phyllite
11.54	11.73	0.19	0.10	11	-do-
11.73	11.91	0.18	0.18	100	-do-
11.91	40.00	28.09	-	-	Dark grey (greyish brown) sand –sludge. The core is collected from the return water

Tabell 2.4. Gelogisk logging av borrehull for inklinometer.

Skjærparameter		Trykk, normalt
c (kg/cm ²)	φ (grader)	1 kg/cm ²
0.075	33	2 kg/cm ²
		4 kg/cm ²

Tabell 2.5 Resultater fra direkte skjærttest.

3 Metoder for stabilitetsanalyser

I utgangspunktet var det tre forskjellige regneprogrammer som skulle testes hver for seg og opp mot hverandre i stabilitetsanalysene av skråningen i Kharbandi. Programmene var:

Slide	fra Rocscience
Phase ² 5.0	fra Rocscience
Slope/W	fra GEO-SLOPE

3.1 Bruken av forskjellige regneprogrammer

Slope/W er et regneprogram ofte benyttet av NGI, og er en velakseptert software som mange har satt seg inn i. Dette gjelder også en del av de andre produktene fra GEO-SLOPE, og det fine er at regneprogrammene fra GEO-SLOPE kommer samlet under applikasjonen GeoStudio, hvor de ulike applikasjonene kan brukes om hverandre.

Slide er derimot ikke tidligere brukt ved NGI, så dette er en ny programvare som bør testes både for seg selv og opp mot f.eks. Slope/W. Slide kommer fra Rocscience som også selger regneprogrammet Phase² 5.0

Phase² 5.0 er et regneprogram opprinnelig ment for å bergne stabiliteten i bergrom og ikke av skråninger eller andre eksterne former. En av utfordringene i denne oppgaven var å undersøke om det lot seg gjøre og importere og/eller modellere samme skråning i Phase² 5.0 som i Slide.

3.1.1 Slide v4.0

Dette regneprogrammet er relativt lett å sette seg inn. Det er på mange måter intuitivt og ryddig. Kharbandi-skråningen var grei å modellere med de oppgitte dataene, og selve regneprosessen av sikkerhetsfaktorene gikk kjapt. Følgende metoder til beregning av sikkerhetsfaktoren er mulig i programmet:

- Bishop simplified
- Janbu simplified
- Janbu corrected
- Ordinary

Spencer
GLE
Lower Karafiath
Corps of Engineers #1
Corps of Engineers #2

Programmet har en mengde funksjoner som kan tilfredsstille de fleste ønsker om design av skråningen. Dette kan være grunnvann, poretrykk, forsterkningsalternativer som f.eks. jordnagler, ulike typer anker og geotekstiler. Det er enkelt å modifisere eller legge inn egendefinerte sikringstiltak. Programmet støtter alternativer som gjør skråningen mindre sikker. Her kan nevnes strekk-sprekker fra overflaten og nedover, pseudostatisk analyse (effekten av jordskjelv) og belastning på overflaten. Mulighetene er mange, og de er lette å utforske. Det er også gode muligheter for å tvinge en ev. slipp-flate hvor man selv ønsker i skråningen.

Etter at analysen er kjørt og man ser på resultatet, finnes det mange nyttige funksjoner for å evaluere skråningen. Man kan f.eks. lagre resultatene i forskjellige bildeformater.

Slide kan foruten sitt eget format, kun lagre figurene før analysen i AutoCAD-format. Flere av de andre regneprogrammene innenfor stabilitetsanalyse er i stand til å importere AutoCAD filer inn som bakgrunnsskisser.

Mohr-Coulomb-styrkekriteriet og Bishop-metoden er benyttet i beregningene av stabiliteten i Kharbandi-skredet.

3.1.2 Phase² v5.0

Intensjonen var å skulle importere de ferdige figurene av Kharbandi-skredet inn i Phase² 5.0 for å sjekke om dette programmet ville gi like resultater som Slide. Etter mange forsøk, samt lesning i manualer og på hjemmesiden til Rocscience, kunne det konkluderes med at denne typen modellering ikke var mulig i Phase² 5.0. Regneprogrammet var innkjøpt nytt samme halvåret, så pr. tid hadde jeg nyeste versjon av softwaren. Nå skulle det vise seg at det senere kom en nyere versjon, Phase² 6.0, som inneholdt denne muligheten for å importere direkte fra Slide til Phase². Phase² 6.0 kan derfor også gjøre modelleringer for "Finite Slope Stability

Analysis”, i motsetning til Phase² 5.0. Det ble derfor ikke gjort noen stabilitetsanalyser i Phase² 5.0.

3.1.3 Slope/W v5.19

Dette regneprogrammet kan gjøre det meste slik som tilfellet er med Slide.

Sikkerhetsfaktorene kan bergenes utifra følgende metoder:

Bishop

Janbu

Janbu generalized

Ordinary

GLE

Spencer

Lower-Karafiath

Corps of Engineers #1

Corps of Engineers #2

Sama (vertical slice only)

Morgenstern-Price

Programmet kan både importere og eksportere figurer via forskjellige bildeformater (inkludert AutoCAD formatet)

Mohr-Coulomb-styrkekriteriet og Bishop-metoden er benyttet i bergningene av stabiliteten i Kharbandi-skredet.

4 Resultater av stabilitetsanalysene

Noen representative figurer av Kharbandi-skredet er vist i teksten, mens de resterende figurene er samlet bakerst i oppgaven som vedlegg. Bare sikkerhetsfaktorene er tatt med i teksten for alle analysene.

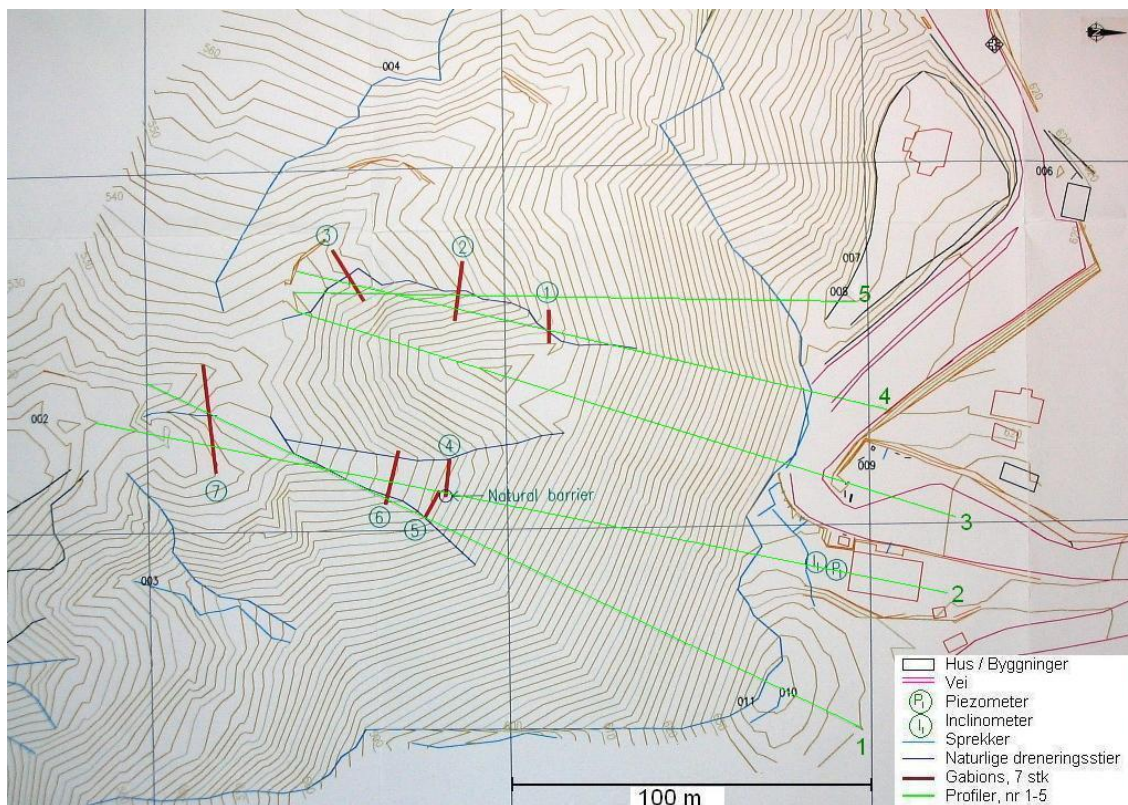
4.1 Beregning av sikkerhetsfaktorer

Skjærstyrkeparametrene i tabell 4.1 er brukt i regneprogrammene for å estimere sikkerhetsfaktorene.

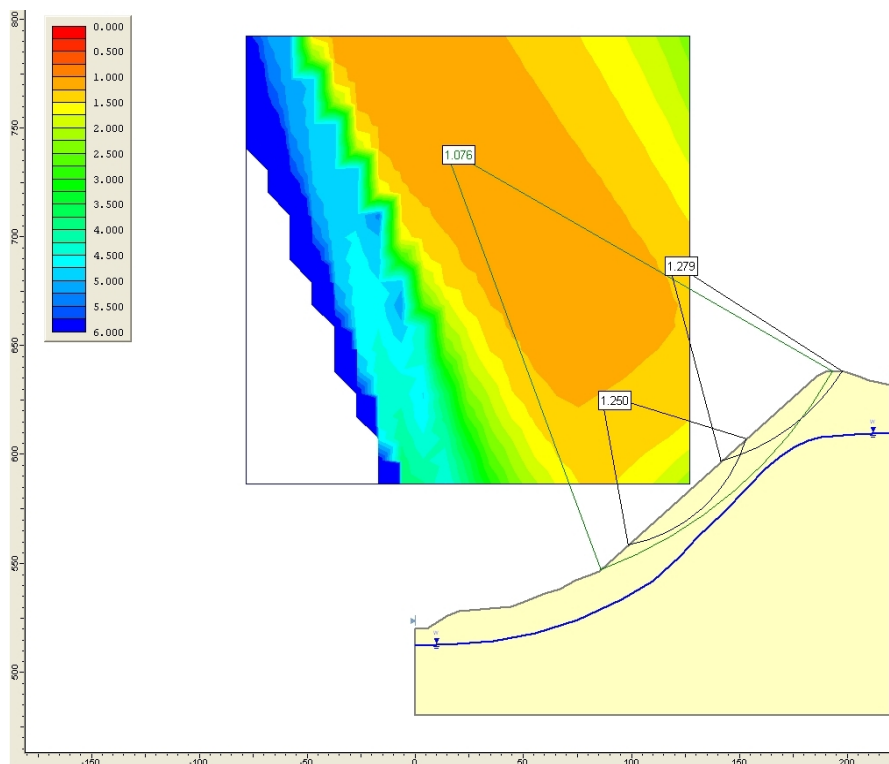
	Tettheten, γ_d insitu	Effektiv skjærparameter	
		c'	ϕ'
Verdier fra Bhasin et al. (2003)	2.15 gm/cc	0.23 kg/cm ²	32.1°
Omregnede verdier til bruk i regneprogrammene	21.1 kN/m ³	22.6 kN/m ²	36° (oppjustert)

Tabell 4.1. Liste over skjærstyrkeparametrene som er benyttet i regneprogrammene ved stabilitetsanalysene av Kharbandi-skredet.

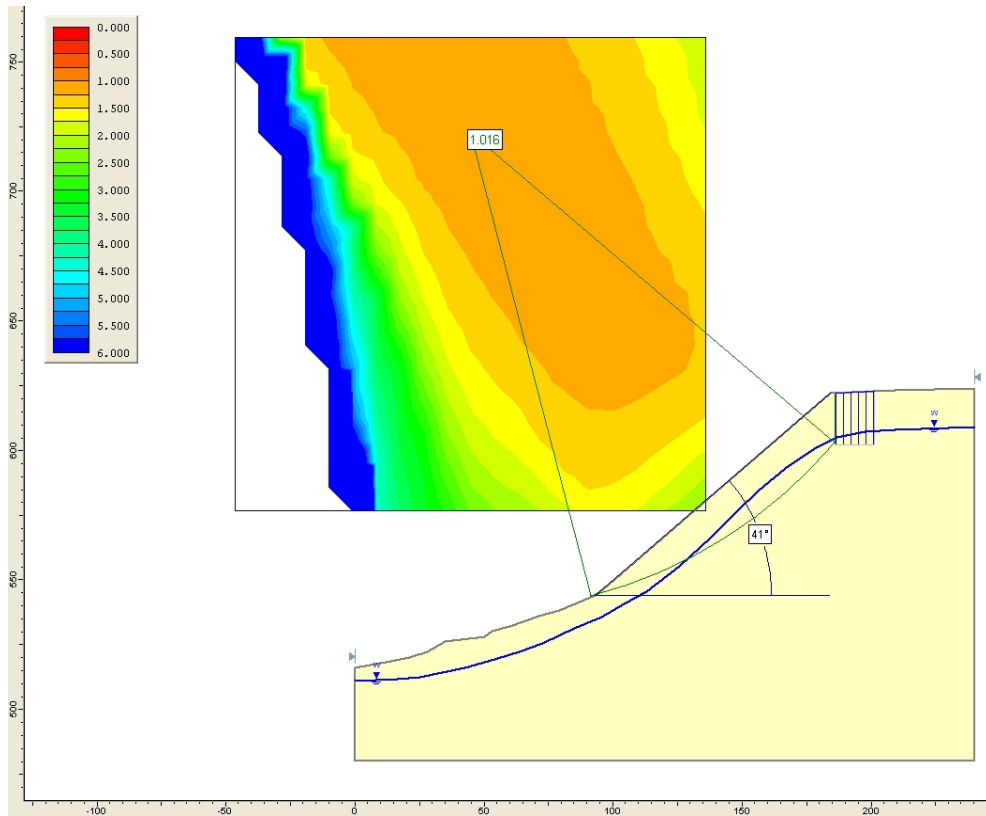
Legg merke til at ϕ' -verdien er oppjustert. Den opprinnelige ϕ' -verdien resulterte i sikkerhetsfaktorer under 1 i regneprogrammene. ϕ' -verdien ble da økt gradvis til sikkerhetsverdiene kom over 1 med Bishop metoden. Det er brukt 5 profiler fra Kharbandi-skredet. Plasseringen av disse profilene er vist i figur 4.1. De fem tverrsnittene er valgt ut på en slik måte at de representerer den kritiske delen av skråningen med hensyn til bebyggelsen og veien.



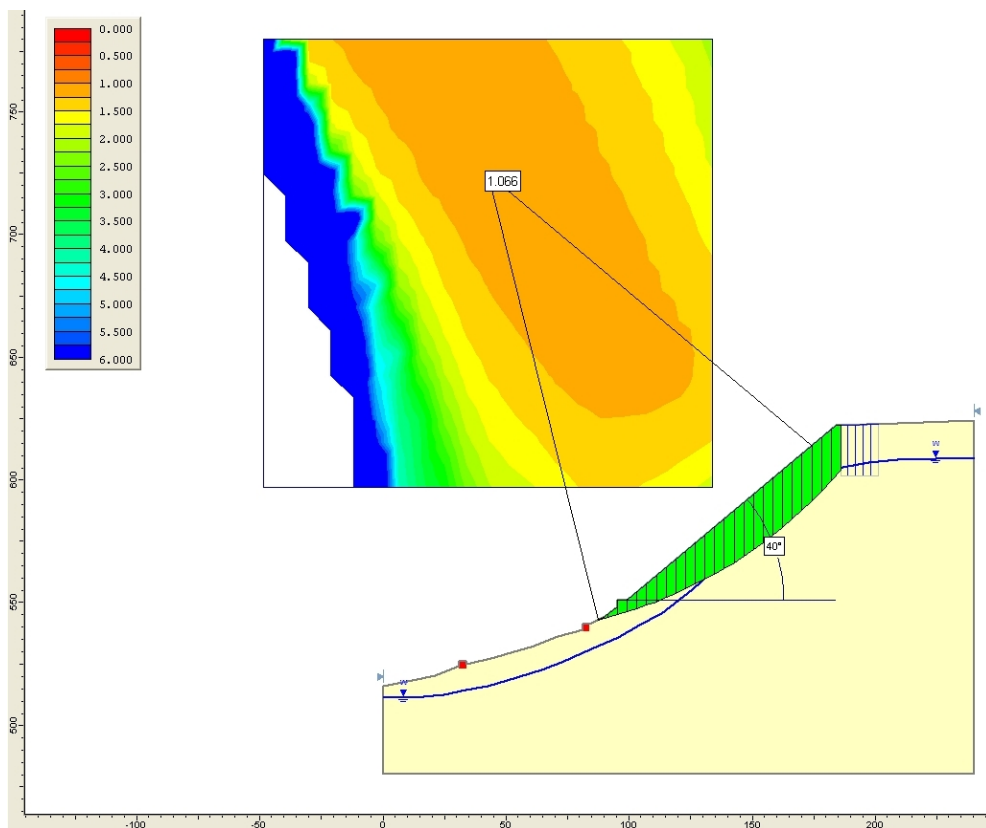
Figur 4.1. Kart over Kharbandi-skredet og plasseringen av profilene inne i skråningen.



Figur 4.2. Profil 1 med laveste sikkerhetsfaktor (SF = 1.076) og sikkerhetsfaktorer for to utvalgte grunnere skred.



Figur 4.3. Profil 2 uten gabioner. FS = 1.016. Skråningsvinkel på 41 grader.



Figur 4.4. Profil 2 med gabioner (røde) og strekkbrudd fylt med vann øverst i skråningen. SF = 1.066. Skråningsvinkelen er nå 40° mot tidligere 41°.

Sikkerhetsfaktorer, FS			
Profil nr	Slide	Slope/W	Endring i FS (%)
1	1.076	1.111	3,25
2	1.080	1.114	3,15
3	1.103	1.104	0,91
4	1.134	1,148	1,23
5	1.065	1.075	0,94

Tabell 4.2. Sikkerhetsfaktorer sammenlignet mellom Slide og Slope/W, Endringen er målt i %.

4.1.1 Reduksjon av destabiliserende krefter

Sikkerhetsfaktorer, FS			
	Saturet strekkbrudd øverst i skråningen. Høyt grunnvann.	Uten strekkbrudd. Høyt grunnvann.	
Profil	Slide	Slide	Endring i FS(%)
1	1.024	1.076	5.08
2	1.066	1.108	3.94
3	1.055	1.103	4.55
4	1.083	1.134	4.71
5	1.012	1.065	5.24

Tabell 4.3. Modellering med og uten strekkbrudd i øvre del av skråningen. 15 m. ned til grunnvannet ved kontrollpost.

Tabell 4.3 viser at alle profilene fra Kharbandi-skredet gir ca samme utslag i FS ved like endringer i profilene. De resterende FS er alle kalkulert med profil 2, da dette profilet går gjennom gabioner og kontrollpost hvor inklinometeret og piezometeret står. En sammenligningsverdi for FS må velges, og det er derfor fornuftig å velge den laveste verdien i det verst tenkelige tilfellet av skråningsforholdene. Denne verdien likevel ligge innenfor de stabile verdiene siden skråningen fremdeles står der. På grunnlag av observasjoner og måledata fra skredområdet, er disse naturlige ekstrembetingelsene gitt ved høyeste

grunnvannsnivå (15 m. under kontrollpost) og strekkbrudd fylt med vann i de mest nedbørsaktive periodene. Ved høyeste grunnvannsnivå er det ikke observert grunnvann rennende ut av skråningen, så modelleringen for referanseverdien er kalkulert med et grunnvannsspeil liggende hele veien under skredoverflaten. Referanseverdien for profil 2 er da beregnet til $FS = 1.066$ ved Bishop-metoden. Resultater fra modelleringen med reduksjon i destabiliserende krefter er gitt i tabell 4.4.

Sikkerhetsfaktorer, FS, for profil nr 2		
Sammenligningsverdi = 1.066		
	Slide	Endring i FS(%)
Uten strekkbrudd. Høyt grunnvann.	1.108	3.94
Uten strekkbrudd. Lavt grunnvann.	1.172	9.94
Med tørt strekkbrudd. Høyt grunnvann.	1.107	3.85
Med tørt strekkbrudd. Lavt grunnvann.	1.173	10.04

Tabell 4.4. Reduksjon av destabiliserende krefter i profil 2.

En annen måte å øke FS ved reduksjon av destabiliserende krefter, er å forandre skråningsvinkelen ved å fylle materiale i bunnen. Dette modelleringsalternativet er allerede lagt inn i sammenligningsverdien ved konstruksjonen av gabioner ved skråningsfoten. Se figurene 4.3 og 4.4.

Andre alternativer til å redusere de destabiliserende kreftene, men som ikke er aktuelt i Kharbandi-skredet grunnet økonomi og bebyggelse langs skredkanten, er:

- Redusere vekten på toppen ved enten å fjerne materialet eller å bytte ut materialet i skråningen med et sterkere materiale.
- Spesielle teknikker som elektro-osmose, vakum-drenering eller "siphonering".

4.1.2 Økning av stabiliserende krefter

Sikkerhetsfaktorer, FS, for profil nr 2		
Sammenligningsverdi = 1.066		
	Slide	Endring i FS(%)
Jordnagler, 100 kN strekkapasitet, 100 kN platekapasitet, 50 kN bindingsstyrke (utdragningsstyrke)	1.119	4.97
Mikropillarer, 20 kN skjærstyrke	1.068	0.19
Mikropillarer, 50 kN skjærstyrke	1.090	2.25
Mikropillarer, 100 kN skjærstyrke	1.121	5.16
Dødmannsanker, 100 kN ankerkapasitet	1.118	4.88
”Grouted Tieback”, 100 kN strekkapasitet, 100 kN platekapasitet, 50 kN bindingsstyrke (utdragningsstyrke)	1.120	5.07
”Tieback” med friksjon, 100 kN strekkapasitet, 100 kN platekapasitet, 5 kN/m ² adhesjon, 40° friksjonsvinkel, 0.1 m. ”grouting” diameter	1.125	5.53
”Buttress”	1.113	4.41
”Buttress” + jordnagler	1.202	12,76

Tabell 4.5. Økning av stabiliserende krefter.

Geotekstiler er også et forsterkningsalternativ som ligger inne i Slide-programmet. I dette tilfellet ga det ingen fornuftige resultater å bruke denne type forsterkning inne i skråningen. Geotekstilene måtte enten gå urealistisk langt inn i skråningen eller få en urealistisk høy strekkstyrke for å påvirke sikkerhetsfaktoren i særlig grad. Grunnen til at dette alternativet ikke var til nytte, kan sannsynligvis være at de potensielle minimums-slipp-flatene går for dypt. Hadde skredflatene ligget grunnere, ville nok geotekstilene vært til god nytte for stabiliseringseffekten. Ved større fyllinger langs skråningens fot, hadde geotekstilene vært et godt alternativ inne i fyllmassene.

Foruten forsterkningsalternativene i Slide, er også følgende alternativer med på å øke de stabiliserende kreftene:

- Forsterke materialets interne styrke.
- Bygge støttevegger mot/i skråningen.
- Undergrunnsdrenering.
- Forsterke fyllmasser bak en støttevegg.

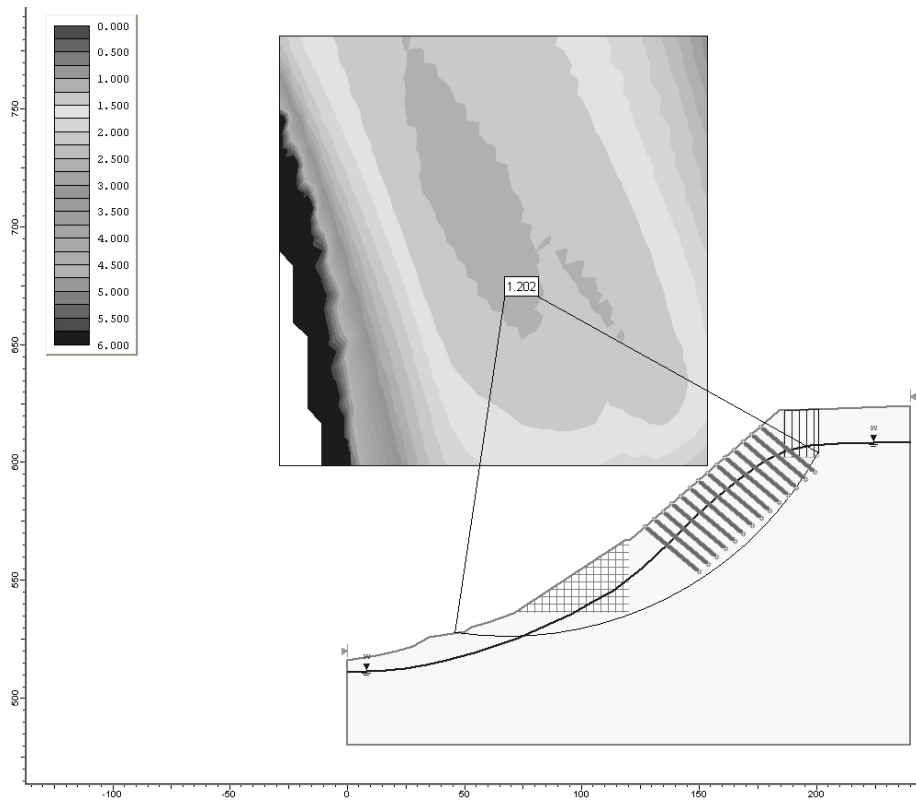
4.1.3 Effekten av destabiliserende krefter

Sikkerhetsfaktorer, FS, for profil nr 2			
Sammenlignings- verdi		Slide	Endring i FS(%)
1.066	500 kN/m belastning på toppen av skråningen.	1.019	-4.41
1.066	Grunnvann rennende ut i dagen ved nedre del av skråningen.	1.046	-1.88
1.119	Grunnvann ut i dagen. Jordnagler.	1.077	-3.75
1.202	Grunnvann ut i dagen. ”Buttress”. Jordnagler.	1.220	1.50
1.066	Seismisk aktivitet.	0.682	-36.02
1.119	Seismisk aktivitet. Jordnagler.	0.740	-33.87
1.199	Seismisk aktivitet. ”Buttress”. Lavt grunnvann.	0.770	-35.78
1.220	Seismisk aktivitet. ”Buttress”. Jordnagler.	0.802	-34.26
1.046	Seismisk aktivitet. Grunnvann ut i dagen.	0.682	-34.80
1.077	Seismisk aktivitet. Grunnvann ut i dagen. Jordnagler.	0.714	-33.70

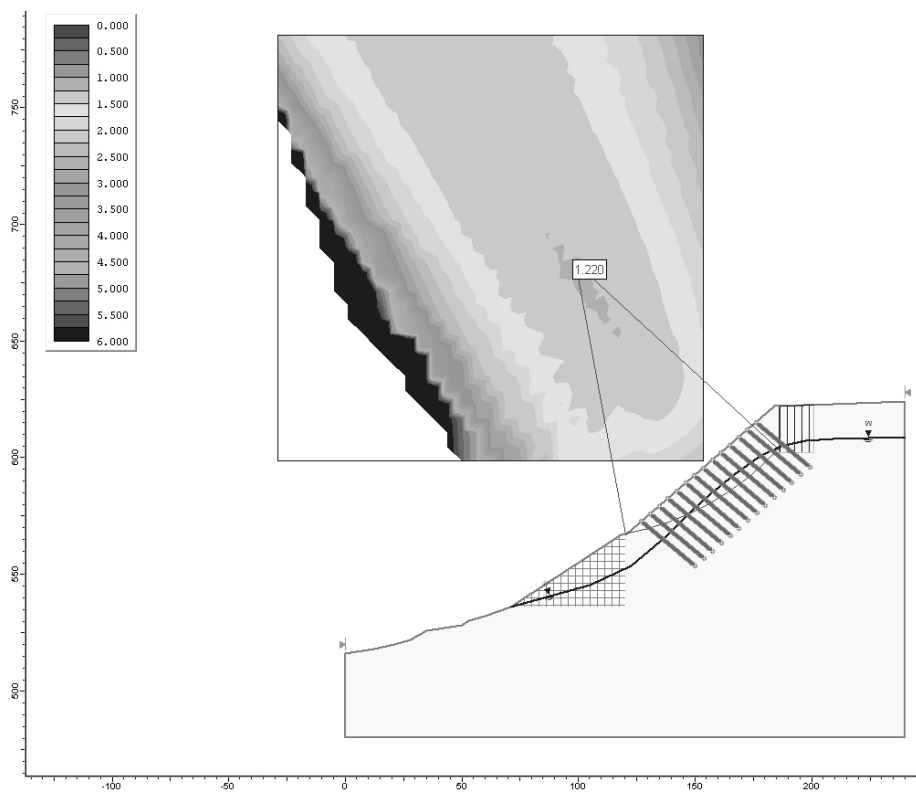
Tabell 4.6. Effekten av destabiliserende krefter. Den seismiske aktiviteten er modellert ved å legge inn seismisk koeffisient; 0.2 i horisontalplanet og -0.1 i vertikalplanet (pseudo-statisk analyse). Legg merke til den positive prosentverdien som intuitivt virker feilberegnet. For å forstå programmets utregning av disse sikkerhetsfaktorene, vises disse to skråningsmodellene i figur 4.5 og 4.6.

Som forventet går sikkerhetsfaktorene ned ved økning i destabiliserende krefter, se tabell 4.6. Legg spesielt merke til den positive prosentverdien for modelleringen med grunnvann ut i dagen kombinert med ”buttress” og jordnagler. Figur 4.5 og 4.6 viser hvordan Slide har modellert de to situasjonene med grunnvann under overflaten og grunnvann rennende ut i dagen.

Den pseudo-statistiske analysen med seismikkmodelleringer gir utløsninger av skred i alle de tenkte situasjonene. Bhutan er, som beskrevet tidligere, en del av et større område med mye seismisk aktivitet.



Figur 4.5. ”Buttress”, jordnagler og grunnvann under overflaten. FS = 1.202.



Figur 4.6. ”Buttress”, jordnagler og grunnvann rennende ut i dagen ved foten av skråningen. FS = 1.220.

5 Diskusjon av resultater og usikkerheter

5.1 Sikkerhetsfaktorer beregnet innenfor samme regneprogram

Slide ga generelt for lave sikkerhetsfaktorer da de opprinnelige skjærstyrkeparametrene fra tabell 4.1 ble brukt. Alle fem profilene resulterte i FS mindre enn 1, hvilket betyr at skråningen ikke eksisterer som vist i kartet. For å oppjustere FS til å bli lik 1 eller mer, ble friksjonsvinkelen gradvis høynet til 36°. Da ga Bishop-metoden verdier over 1 selv for det minst stabile profilet. Dersom noen av de andre metodene hadde blitt brukt, f.eks. Janbus korrigerende metode, måtte friksjonsvinkelen ha blitt satt enda høyere for å få skråningen til å stå.

Ved bruk av programmets mange modelleringsmuligheter, ble de ulike FS vurdert opp mot hverandre, og beregningene ga troverdige resultater i form av høyere og lavere verdier som forventet. Ett unntak må nevnes, og det er tilfellet hvor FS-endringen var positiv, mens de resterende var negative som antatt. Ved å studere de tilhørende profilene opp mot hverandre, er det vanskelig å avgjøre om programmet har estimert en sannsynlig feil eller om endringen av grunnvannsnivået virkelig hadde gitt et slikt resultat i realiteten. Det avgjørende er nok plasseringen av ”buttressen” i forhold til grunnvannet

I den grad Slope/W ble brukt, kom det ingen overraskelser i form av uventede endringer i FS. Slope/W er et godt uttestet program ved NGI, og de gangene programmet gir merkelige resultater, er det oftest i forbindelse med ”feil” i selve innmatingen av data. Bishop-metoden ble også benyttet i dette programmet for lettere kunne sammenligne programmet med Slide. Det er verdt å merke seg at Slope/W, på samme måte som Slide, gir høyere FS for Bishop-metoden enn Janbu.

5.1.1 Sikkerhetsfaktorer fra Slide og Slope/W

Karakteristisk her er at Slope/W generelt gir høyere verdier av FS enn Slide. For de fem profilene fra Kharbandi-skredet, ligger Slope/W gjennomsnittlig ca 2 % høyere i FS-verdier enn Slide. Det kan være mange faktorer til dette, alt fra hvordan dataene innmattes til selve beregningsprosessen i programmene. Slope/W bruker lengre tid til utregningene enn Slide. Mest sannsynlig er det selve prosesseringen av FS, i de to programmene, som gjøres ulikt.

Denne gangen ble det ikke testet andre utregningsmetoder mot hverandre, så det gjenstår å se om Slope/W også gir høyere verdier av FS ved å bruke f.eks. Janbu eller Ordinary Method of Slices.

Den største usikkerheten i sammenligningen av de to programmene er om de bruker samme varianter av utregningsmetodene. Slide oppgir Bishop som Bishop simplified, mens Slope/W kaller metoden bare for Bishop. Likeledes er det også samme problemet med Janbu, der Slide har Janbu simplified og Janbu corrected, har Slope/W Janbu og Janbu Generalized.

5.2 Brukervennlighet av regneprogrammene

Slide er et usedvanlig ryddig og brukervennlig program som det er lett å sette seg inn i. Menyene og layouten er intuitive og enkle å navigere i. I brukermanualene er det en nyttig og lettfattelig lærebok som gjør det kjapt å komme i gang. Programmet er knyttet opp mot to tilhørende applikasjoner, hvor den ene er selve regneprogrammet og den andre er visningseditoren for beregningene av de modellerte figurene. I visningseditoren (SlideInterpret) er det svært mange visningsvarianter for skråningens skredflater. Slide er et hurtig program som gir resultatene uten nevneverdig ventetid. En av programmets store fordeler, er den enkle måten å tegne figurene på. Man kan enten tegne med musen eller taste koordinatene direkte inn for en gitt skråning. Programmet har ekskludert irriterende problemer som proporsjoner på skala og visningsområde.

Slope/W er et noe mer tungvint program som det kan ta litt tid å sette seg inn i. Det mangler det intuitive brukergrensesnittet, og har i tillegg en noe uryddig layout. Løsningen med å gi et inntrykk av at man tegner på et ark, er i seg selv grunnlaget for startvansker når man er ny i programmet. Det er en del innstillinger som må defineres før man kan starte med modelleringen. Slike start-innstillinger burde være plassert i samme rubrikk, men istedet må man klikke seg gjennom mange instillingsbokser før man endelig kan starte med selve modelleringen. Man kan selvfølgelig la innstillingene stå som ferdigdefinerte til senere jobbing med programmet, men disse innstillingene må omdefineres ved nye problemer. I Slope/W er det også to andre applikasjoner, hvor den ene er regneprogrammet og den andre er visningseditoren. Programmet er ikke like kjapt som Slide, og spesielt utregningene kan ta forholdsvis lang tid. I Slope/W må man tegne med musen, og det er relativt tungvint å rette på figurene under modelleringen. Programmet kan med fordel gjøres mere brukervennlig.

5.3 Usikkerhetsfaktorer

Det er mange usikkerhetsmomenter i denne oppgaven, og det gis her en oversikt over de viktigste faktorene.

5.3.1 Regneprogrammene

Som delvis evaluert tidligere innehar programmene visse usikkerheter i beregningsprosessene, da det er uklart hvilke spesifikke regnevarianter som brukes i de ulike metodene. Man bør aldri stole blindt på et dataprogram samme hvor sofistikert det er laget. Sikkerhetsfaktorene og de angitte slippsonene i en modell vil sjelden tilsvare virkelighetens komplekse og delvis uforutsigbare natur. Regneprogrammene jobber med rene og stilistiske modeller som oppfører seg forutsigbart. Et av de største problemene med Slide og Slope/W er at de ikke regner med tredimensjonale figurer, men bare i to dimensjoner. En skråning som gir sikkerhetsfaktorer rundt én, kan i noen omgivelser være stabil, mens i andre er den ustabil.

Modelleringen av Kharbandi-skråningen antar en homogen og forvitret bergpakke uten indre strukturer og svakhetssoner. Dette er ikke tilfellet i virkeligheten, men hvilke svakhetssoner som finnes og hvor dybt forvitringen går står fremdeles ubesvart.

5.3.2 Kart og profil

Kartet som profilene er tegnet ut ifra er sannsynligvis relativt unøyaktig. Hvordan det har blitt fremstilt og hvor mange kopieringer det har vært igjennom, er med på å forringe kvaliteten og nøyaktigheten av kartdataene. Et annet problem er at skredområdet er i stadig forandring både morfologisk og skråningsmessig grunnet konstruksjoner av gabioner og stor erosjonsrate. Siden kartet inneholder store usikkerheter, vil profilene inneholde desto større usikkerheter. De eneste sikre opplysningene er at forvitringen strekker seg ned til minimum 40 m. ved kontrollpost nær Phuentsholing og at grunnvannsnivået har variert fra 15 m. til 21 m. under overflaten.

5.3.3 Innsamlede data

Dataene over skjærstyrkeparametrene gjengir prøvenes materialegenskaper under testforholdene i laboratoriet. Disse prøvene og selve testbetingelsene kan variere stort fra de

gjennomsnittlige materialegenskapene i selve skråningen. Brukes skjærstyrkeparametrene fra 2003-rapporten direkte i Slide eller Slope/W, gir disse dataene en ustabil skråning som etter modelleringen egentlig skulle vært nedrast. Problemet med små bergprøver er at de større strukturene blir utelatt, hvilke som ofte viser seg å være stabilitetsstyrende for skråningene. Siden jeg selv ikke har vært med på å samle inn dataene fra Kharbandi, er det vanskelig for meg å vurdere hvilke parametere som kan justeres opp og ned, og samtidig representere reelle størrelser/egenskaper fra Kharbandi-skredet.

6 Forslag til sikringstiltak

6.1 Kharbandi-skredet

Sikringstiltak som allerede er satt igang i området:

- Konstruksjonen av gabioner i nedre del av skråningen. Gabionene er med på å opprettholde og, i beste fall, øke den naturlige friksjonsvinkelen, samt å dempe den kraftige erosjonen som pågår i monsun-månedene.
- Fylling av de mest kritiske sprekkene i bakkant av skråningen, samt å dekke med elastisk plast for å forhindre vanninnstrømning under kraftige nedbørsperioder. Dekke plasten med jord og organisk materiale kombinert med planting av gress på toppen for å forhindre jorderosjon ved regnfall. Ved å forhindre at vann strømmer ned i sprekkene, holdes poretrykket mer konstant og svakere soner inne i skråningen får redusert vanntilførsel.
- Overvåkning av skråningen ved hjelp av inklinometer og piezometer på kontrollpost.

Sikringstiltak som muligens er iverksatt:

- Forsegle dreneringsstiene nær kontrollpost med bitumen fra veiarbeidet like ved.

Forslag til sikringstiltak i området:

- Fortsette med tetting og forsegling av sprekker.

- Senke grunnvannsnivået eller minske vanninnholdet i skråningen ved å lage dreneringsveier på overflaten og/eller konstruere undergrunnsdreneringer som drenerer seg selv ved hjelp av tyngdekraften.
- Drenere overflatevann bort fra skråningen.
- Minske overflateerosjonen i skråningen ved å legge på netting (geotekstiler).

Det finnes selvfølgelig alternativer som kan sikre skråningen veldig bra, som f.eks. endring av skråningsvinkelen ved å fylle løsmasser i bunnen og gradvis oppover. Slike tiltak koster imidlertid mye. Med tanke på landets lave økonomi er nok de beste sikringsalternativene for dyre og ressurskrevende.

6.2 Bhutan generelt

Forslag til sikringstiltak for Bhutan generelt:

- Overflatedrenering og undergrunnsdrenering.
- Støttevegger.
- Forsterkning av jord og løsmasser i tidligere skred.
- Lage hazard-kart over områdene av interesse.
- Flyfoto over hele landet. Disse fotografiene kan brukes til å evaluere skråningsgradientene og deres tilhørende risiko for potensielle skred.
- Overvåkning av bresjøer som er klassifisert som potensielt farlige.

7 Konklusjoner og anbefalinger

Av regneprogrammene Slide og Slope/W er det tydelig at Slide er det mest brukervennlige programmet. Et minus ved begge programmene er at de ikke er spesifikke nok i navngivingen av regnemethodene. Slope/W gir generelt høyere verdier for sikkerhetsfaktorer enn Slide når Bishop-metoden benyttes.

Resultater fra stabilitetsanalysene viser at Kharbandi-skråningen sannsynligvis ligger like innenfor de stabile betingelsene, og at endringer i grunnvannsnivå og/eller sikringstiltak kan få store konsekvenser for skråningsstabiliteten. Et jordskjelv med en seismisk koeffisient på 0.1 eller høyere vil trolig utløse skred i skråningen. Man bør spesielt være oppmerksom på dette under monsunregnet. Da er både grunnvannsnivået og poretrykkene faretruende nær grensen for utløsning av større skred.

Det er mange usikkerhetsfaktorer knyttet til datainnsamlingen og stabilitetsanalysene for Kharbandi-skredet. Kartet som er brukt som kilde til profilene er ganske sikkert unøyaktig og stemmer dårlig med dagens faktiske skråning. Skjærstyrkeparametrene er kanskje litt for lave til å være representative for skråningen i sin helhet.

På grunnlag av 2004-rapporten virker det som om sikringstiltakene, med konstruksjoner av gabioner og tetting av sprekker, har en positiv effekt på sikkerhetsfaktoren. Dersom effektiv drenering av overflaten og/eller undergrunnen settes i verk, er det grunn til å tro at skråningen stabiliseres tilfredsstillende.

8 Referanser

Bhargava, O.N., 1995. The Bhutan Himalaya: A Geological Account, Geological Survey of India, Special Publication 39, Published by the Geological Survey of India, Calcutta

Bhasin, R., Grimstad, E., Dorji, Y., Norbu, P., Giri, N.K., 2003. NGI report 20021216: July 2003, Preventive Measures for Landslide Hazards. Landslide survey report, Bhutan

Bhasin, R., Grimstad, E., Dorji, Y., Norbu, P., 2004. NGI report 20021216-2: April 2004, Preventive Measures for Landslide Hazards. Stabilisation Measures and Tunnel Feasibility Study

Dorji, Y., Kuenza, K., Wangda, D., 2004. Department of Geology & Mines, G.P.O. 173, MTI, Thimpu, Bhutan

Vedlegg A

Representative figurer fra stabilitetsanalysene

