

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Brottförlopp vid genomströmning av en fyllningsdamm

Rapport 00:10

Dammsäkerhet

Brottförlopp vid genomströmning av en
fyllningsdamm

Elforsk rapport 00:10

Dammsäkerhet

Brottförlopp vid genomströmning av en
fyllningsdamm

Elforsk rapport 00:10

Åke Nilsson och Nils Johansson



Förord

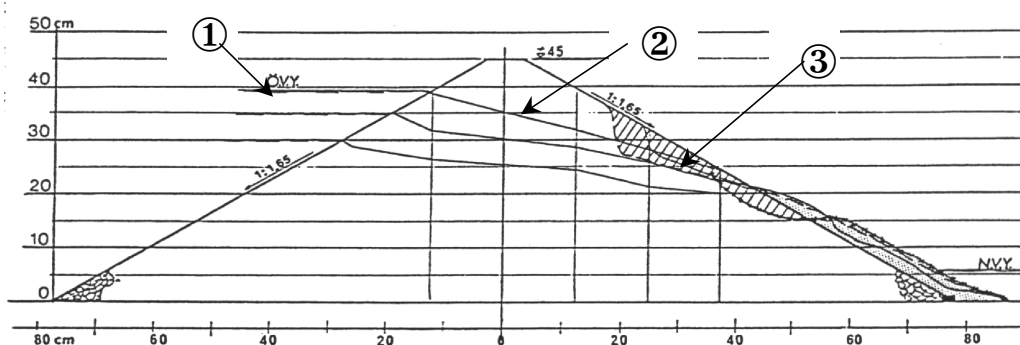
Föreliggande projekt, som beskriver olika möjliga brottförlopp för fyllningsdammar som utsätts för extremt läckage, har genomförts av Åke Nilsson och Nils Johansson, SwedPower AB. Åke har svarat för sammanhållningen och den geotekniska delen av projektet, medan Nils ansvarat för beskrivningen av de hydrauliska modellförsöken utförda vid Älvkarlebylaboratoriet. Vidare har Yanting Chang, likaså från SwedPower AB, medverkat vid beräkningen med hjälp av finita element programmet Plaxis.

Urban Norstedt från Vattenfall och Gunnar Sjödin från Vattenregleringsföretagen har följt projektet och lämnat värdefulla synpunkter.

Sammanfattning

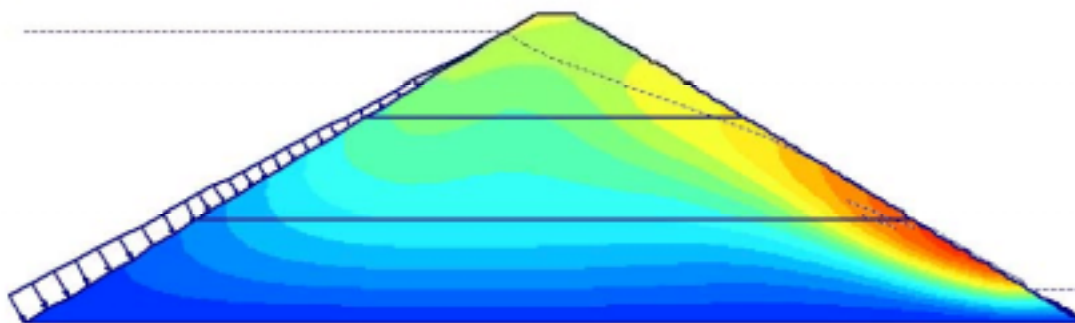
För en fyllningsdamm finns flera olika brottförlopp t ex om inre erosion börjar i tåtkärnan som resulterar i läckage vilket ger erosion i nedströms dammtå där vattnet strömmar ut. Risken för fortsatt brottförlopp bedöms vanligen från faktorer som bestämmer erosionsrisken, dvs utströmmande vattenflöde, stenstorlek för "tåstenen" och lutningen på nedströmsslänten.

Denna rapport presenterar möjligheten för att läckaget leder till ett annat brottförlopp (utglidning), där brottförloppet bestäms av friktionsvinkeln hos fyllningsmaterialet, släntlutningen och vattentrycket i fyllningen. Detta senare brottförlopp demonstreras av resultat från fysiskt modellförsök som tidigare utförts vid Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby, se följande figur.



Resultat från modellförsök i vattenlaboratoriet i Älvkarleby, (1) uppströms vattennivå, (2) grundvattenyta och (3) utglidningar

Finite element beräkningar har gjorts för att efterlikna laboratorieförsöken. Resultatet från en av beräkningarna framgår av nedanstående figur. De numeriska beräkningarna har gjorts med finita elementprogrammet Plaxis version 7.0, som finns på marknaden sedan april 1998. Brottförloppet med utglidningar som observerades i modellförsöken kan jämföras med mönstret av beräknade deformationer från beräkningarna med Plaxis. Denna jämförelse visar mycket god överensstämmelse mellan modellförsöken och Plaxismodellen.



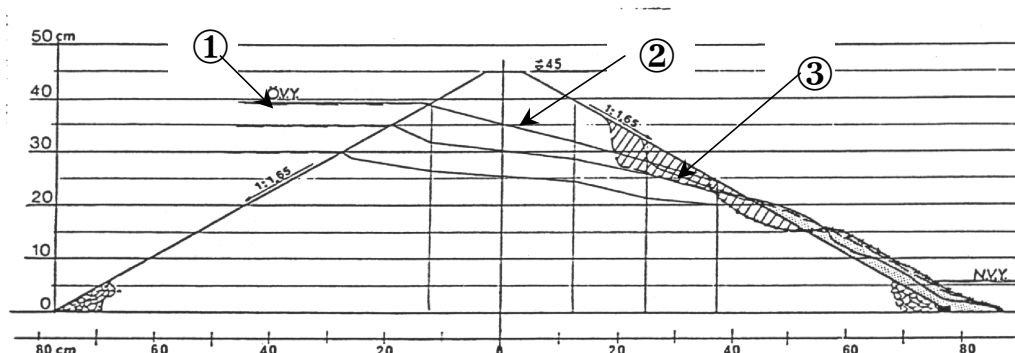
Konturer för olika deformationer

Summary

FAILURE MODES FOR FLOW THROUGH EMBANKMENTS

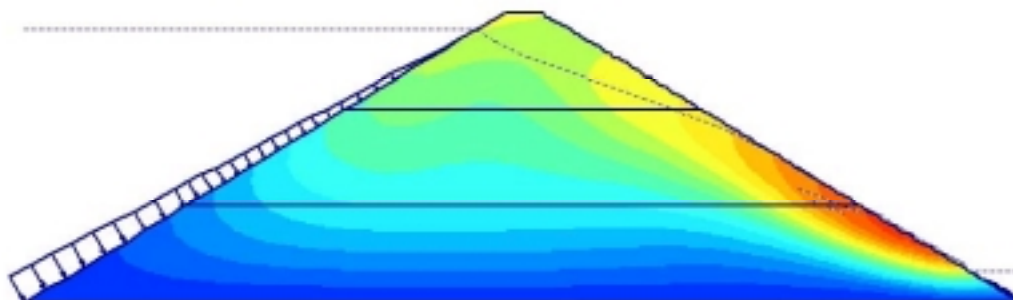
For embankment dams many possible failure modes e.g. initiated by internal erosion results in seepage followed by slope unravelling or scouring at the downstream toe. The risk for a progressing failure is usually assessed assuming that the governing factors are discharge flow, toe-stone size and slope angle.

This report presents the possibility for the seepage to be followed by an alternative failure mode (mass sliding) where the friction angle, slope angle and the water pressure field are the governing factors. Engineers in the geotechnical field have earlier described this failure mode. This later failure mode is demonstrated by results of a physical model test, see following figure.



Results of flume test, (1) upstream water level, (2) phreatic surface and (3) areas with mass sliding

On the bases of the physical flume test a model for use in a finite element analyses has been set up. Results of finite element analyses are also presented showing factors influencing the failure mechanisms, see figure below. The numerical calculations were done by means of the finite element code Plaxis version 7.0, which was released in April 1998. The observed failure mode by mass sliding in the flume test could be compared with the pattern of calculated deformations in the Plaxis model shown in the figure below. This comparison shows good similarity between the observations in the physical model and the pattern of calculated deformations.



Absolute displacement contours

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	ORIENTERING	1
1.2	BAKGRUND.....	1
1.3	MÅL	1
2	Modellförsök vid Älvkarlebylaboratoriet.....	2
2.1	BAKGRUND TILL MODELLFÖRSÖKEN.....	2
2.2	TIDIGARE STUDIER.....	2
2.3	BESKRIVNING AV MODELLFÖRSÖKEN	2
2.4	UTVÄRDERING AV GENOMSTRÖMNINGSFÖRSÖKEN.....	8
3	Finita Elementberäkningar	9
3.1	ALLMÄNT	9
3.2	BERÄKNINGSRESULTAT	10
4	Diskussion och jämförelse med litteraturuppgifter	15
4.1	UTGLIDNING.....	15
4.2	EROSION	16
4.3	DIMENSIONERING FÖR LÄCKAGE	17
5	Slutsatser	18
6	Referenser	19

1 Inledning

1.1 Orientering

Många brottförlopp för en fyllningsdamm som t ex startar med inre erosion i tätkärnan fortsätter i form av erosion vid nedströms dammtå där vattnet strömmar ut. Risken för fortsatt förlopp bedöms vanligen från att de bestämmande faktorerna är utströmmande flödet, storlek hos ”tåstenen” och släntlutningen. Ingenjörer inom hydraulik beskriver vanligen detta brottförlopp.

Denna rapport beskriver ett annat brottförlopp (utglidning) där brottet bestäms av faktorer som friktionsvinkel hos stödfyllningen, släntlutningen och vattentrycken i fyllningen. Ingenjörer inom geoteknik har tidigare beskrivit detta brottförlopp. Detta senare brottförlopp demonstreras i rapporten med hjälp av resultat från fysiska modellförsök. Vidare presenteras resultat från finita elementberäkningar som visar faktorer som påverkar brottförloppet.

Från rapporten kan dras slutsatsen att det är viktigt att ingenjörer med olika fackbakgrund deltar då säkerheten skall bedömas för en damm. Om frågor grupperas i traditionella fackområden och behandlas av ingenjörer inom snäva fackområden finns risk att brottförlopp kan förbises.

1.2 Bakgrund

Ett läckage inträffade 1983 i Suorvadammen, som dämmer upp Sveriges näst största magasin ($6 \times 10^9 \text{ m}^3$); endast Vänern är större. Händelsen initierade ett flertal utvecklingsprojekt där stabiliteten av nedströms stödfyllning undersöktes vid genomströmning. En av undersökningarna som beskrivs i det följande var ett modellförsök där grus utsattes för vattengenomströmning.

Läckage har även inträffat i andra dammar i samband med sjunkgropar. Läckaget har oftast självläkt och avstannat innan några åtgärder vidtagits. Ett accelererande förlopp med risk för dammbrott kan dock med stöd av internationell statistik över dammbrott inte uteslutas.

1.3 Mål

I kraftindustrins riktlinjer för dammsäkerheten RIDAS krävs för dammar i konsekvensklass 1 att de skall tåla ett möjligt läckage som dammen kan tänkas bli utsatt för under sin livstid, jämför [4]. Detta ”projekteringsläckage” skall bestämmas för varje damm. För en del dammar bedöms härigenom förstärkningar med en nedströmstå av dränerande material, eventuellt i kombination med dränageanordningar (t ex diken och/eller vertikala dräner) bli aktuella.

Analyserna i föreliggande rapport av de två nämnda brottförloppen ger en möjlighet att bestämma läckageflödet före brott. Härigenom kan också åtgärder projekteras för att öka motståndet vid ett eventuellt läckage.

2 Modellförsök vid Älvkarlebylaboratoriet

2.1 Bakgrund till modellförsöken

Modellförsöken som genomfördes vid Älvkarlebylaboratoriet syftade till att bestämma sambandet mellan stabil stenstorlek i en damms nedströmsslänt och den mängd vatten som strömmade genom dammen.

Dammen i modellförsöken var en homogen stenfyllning utan någon tätkärna eller filter. Tanken var att detta skulle vara det yttersta stadiet i en skadad damm när tätkärna och filter har spolats bort och utan hänsyn till insjunkningen av dammkrönet på grund av massförluster. Modelldammen var fjärran från en verklig damm men syftet var att undersöka nedströmssläntens stabilitet vid genomströmning. I försöken ingick också att undersöka olika typer av förstärkningar av nedströmsslänten.

2.2 Tidigare studier

Ett antal forskare har under åren bidragit med undersökningar av nedströmssläntens stabilitet vid över och genomströmning. Släntlutningen har i dessa undersökningar varit mindre än den normala vid en svensk stenfyllningsdamm. Av författarna kan nämnas A Linford, D H Saunders, jämför [1]

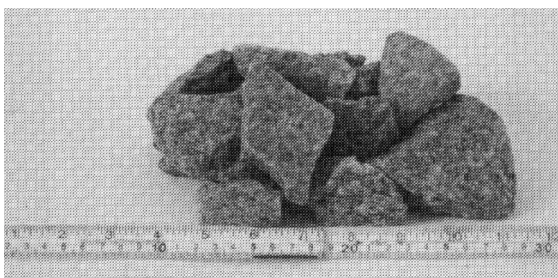
Gemensamt för dessa studier är att de beskriver stabiliteten som ett erosionsförlopp och att Froudes modellregler för stabiliteten är baserad på stenstorlek, flöde per breddenhet och släntlutning. Dammens höjd kommer inte med i beskrivningen av stabiliteten.

2.3 Beskrivning av modellförsöken

2.3.1 Uppbyggnad av dammen

Modellförsöken genomfördes i två olika rännor då en modellfamilj med tre olika höjder på dammen, 45, 90 och 135 cm prövades. Då dammarnas stabilitet genomfördes i en ränna med glasväggar kunde inte materialet komprimeras. Vid byggande av dammarna blev alltså materialet löst packat. Ingen uppmätning av porositeten gjordes.

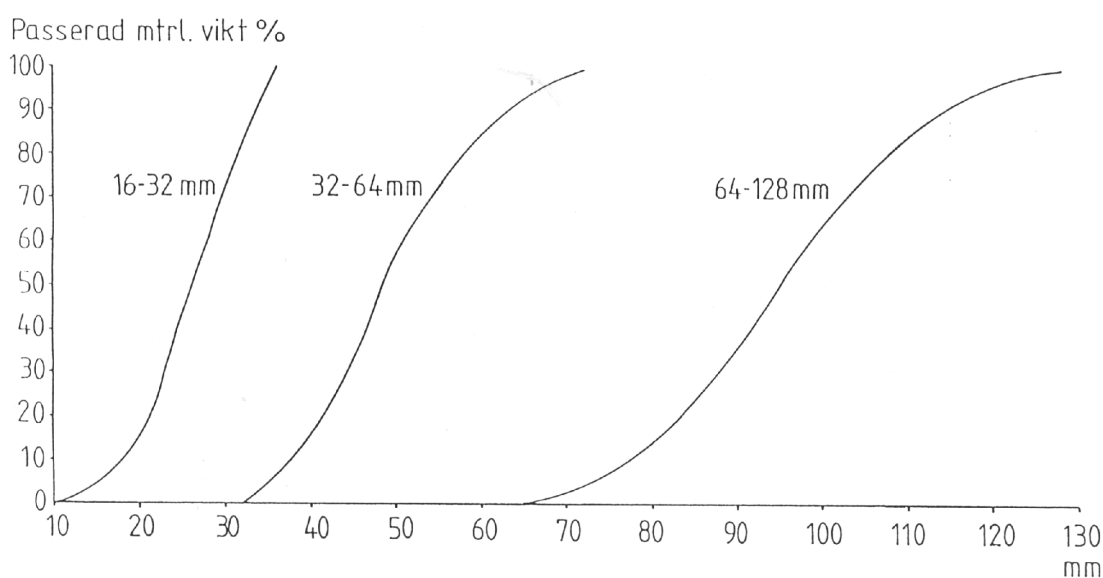
Dammarna byggdes med krossat naturmaterial med kornstorleken 32-64 mm, se foto **figur 2.1**. Försöken innefattade även provningar av olika typer av förstärkningar med finare och grövre material, 6-32 mm och 64-128 mm. Dessa kompletterande försök redovisas dock inte i föreliggande rapport. Kornfördelningen för samtliga material framgår av **figur 2.2**.



Stenfraktion 32-64 mm

Figur 2.1

Stenmaterial som försöksmodellerna byggdes upp av.



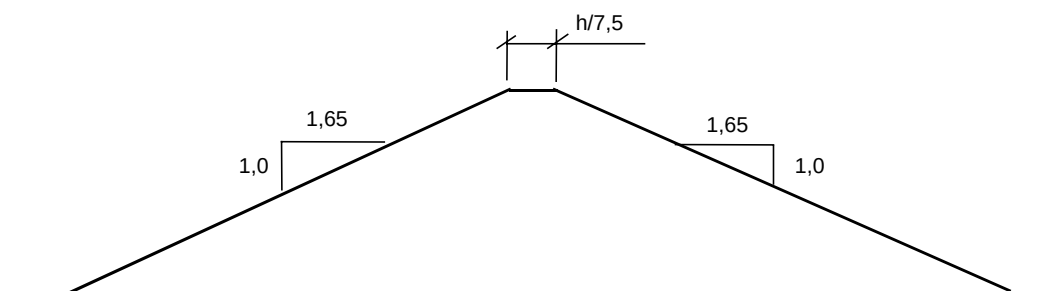
Figur 2.2

Kornfördelning för material 32-64 mm, som modellerna byggdes upp med, tillsammans med finare och grövre material som användes till förstärkningar av modellerna. Försöken med förstärkta modeller redovisas dock inte i föreliggande rapport.

Rasvinkeln på stenmaterialet prövades på enklast möjliga vis genom att stenarna skottades upp i en så brant hög som möjligt. Rasvinkeln på fraktionen 16-32 mm uppmättes härigenom till 39° och på fraktionen 32-64 mm till $42,6^\circ$. De angivna värdena är medelvärden på minst 5 mätningar.

Genomströmningsförsöken omfattade försök med fem olika utformningar av dammkroppen men två försöksserier har en identisk utformning av dammkroppen, men med olika nedströms vattenstånd.

I utformning A, som beskrivs i föreliggande rapport, har uppströms och nedströms slänt lutningen 1,65H:1V och krönets bredd är $h/7,5$ där h är dammhöjden. En skiss på utformningen framgår av **figur 2.3**. Vid dessa försök användes materialet med fraktionen 32-64 mm.



Figur 2.3 Dammsektion för genomströmningsförsöken

Det är denna utformning som användes i utvärderingen om Froudes modellregler stämmer för stabil stenstorlek i en genomströmmad nedströmsslänt. De övriga utformningarna med t ex förstärkningar avhandlas inte mer i föreliggande rapport.

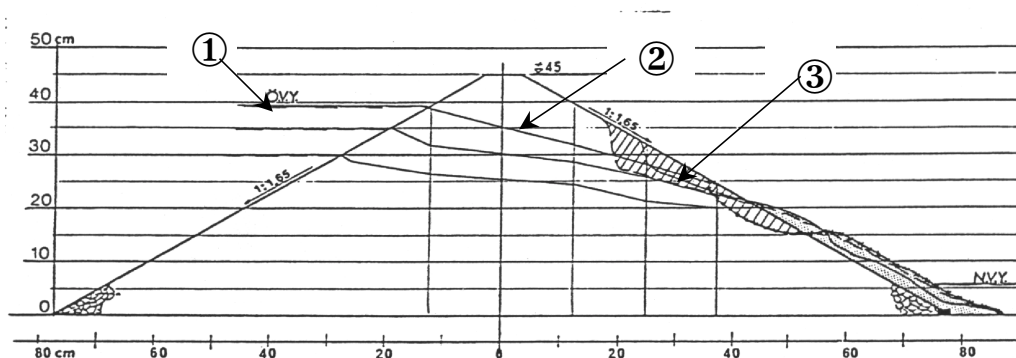
2.3.2 Försöken

Dammkroppen byggdes upp i en ränna med 1,5 m bredd. Strömningen bedömdes vara tvådimensionell och resultat som t ex genomströmmande vattenflöde redovisas här per breddmeter. Under försöken med genomströmning ökades vattenföringen i små steg varvid vattenståndet uppströms och nedströms samt i dammen observerades. Varje utglidning eller förändring i dammkroppen noterades och förloppet videofilmades. De flesta försöken upprepades för att undersöka repeterbarheten i resultaten.

2.3.3 Beskrivning av händelseförloppet vid ras

Nedströmssläntens stabilitet var mycket känslig för förändringar i vattenföring. Efter en liten ökning av vattenföringen stiger uppströms vattenstånd något och detta utlöste vid de tillfällen då man uppnått gränsen för nedströmssläntens stabilitet större eller mindre utglidningar. Efter det att skredet inträffat var slänten i stort sett stabil över tiden. Ser man närmare efter på videoupptagning i slow-motion ser man att rörelserna startar vid källsprånget en bit upp i slänten.

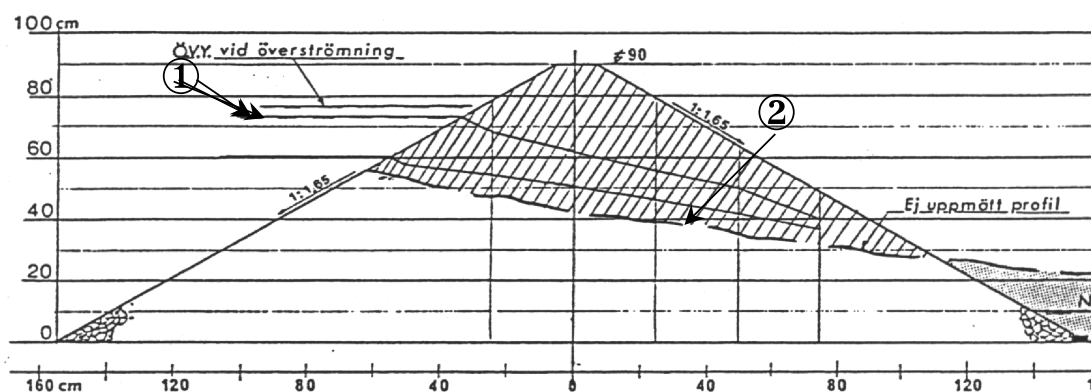
Det vanliga förloppet vid erosion att stenar med oregelbundna intervall sätts i rörelser tycktes inte inträffa. Erosion borde också inträffa i släntfoten där flödet och hastigheten är som störst, inte en bit upp i slänten vid källsprånget. I **figurer 2.4, 2.5 och 2.6** visas skisser på hur skadeförloppet utvecklade sig för tre försök vid dammhöjderna 0,45, 0,9 och 1,35 m tillsammans med anteckningar av observationer under försökens gång.



- ① Uppströms vattennivå
 ② Fria grundvattenytan
 ③ Partier med utglidningar

Uppströms vattenstånd		Nedströms vattenstånd		Flöde	Beskrivning
m	%	m	%	l/s·m	
0,300	66,7	0,055	12,2	8,6	Liten sättning i mitten på 13 cm nivån
0,313	69,6	0,056	12,4	9,4	Litet ras på höger sida på 15 cm nivån
0,320	71,1	0,057	12,7	-	Litet ras i mitten på 17 cm nivån
0,323	71,8	0,058	12,9	10,0	Litet ras i mitten på 20 cm nivån
0,360	80,0	0,062	13,8	13,5	Sättningar på högra halvan upp till 23 cm nivån
0,369	82,0	0,065	14,4	14,2	Sättningar på högra halvan upp till 33 cm nivån
0,395	87,8	0,070	15,6	17,2	En något större utglidning i mitten och på vänstra sidan upp till 33 cm nivån

Figur 2.4 Överst visas en skiss av utglidningarnas form för 0,45 m höga dammen och i tabellen därunder beskrivs iakttagelser när vattenståndet höjs

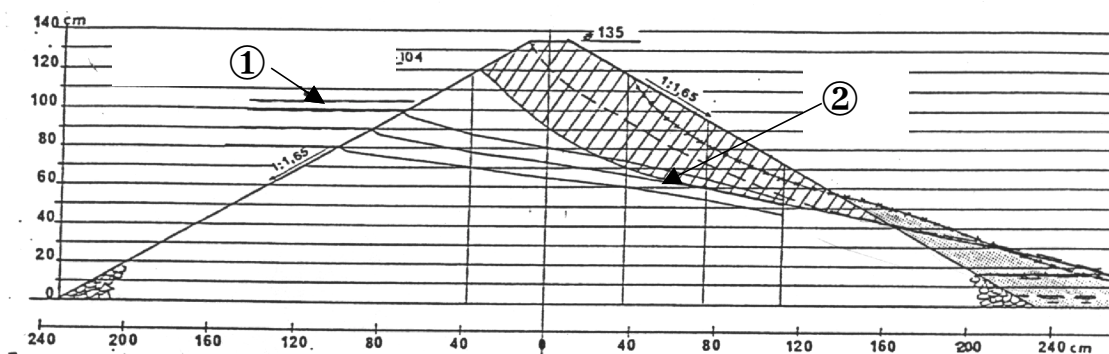


① Uppströms vattennivå vid överströmning

② Profil efter överströmning

Uppströms vattenstånd		Nedströms vattenstånd		Flöde	Beskrivning
m	%	m	%	l/s·m	
0,52	57,8	0,07	7,8	16,0	Litet ras vid släntfoten
0,55	61,1	0,08	8,9	18,0	Liten sättning på 25 cm nivå
0,56	62,2	0,08	8,9	19,0	Liten sättning på 30 cm nivå
0,61	67,8	0,08	8,9	23,0	Större sättning på 30-50 cm nivå
0,64	71,1	0,09	10,0	25,0	Större utglidning på 40 cm nivå
0,67	74,4	0,09	10,0	29,5	Sättning upp till 60 cm nivå
0,70	77,8	0,09	10,0	32,0	Stor utglidning ända upp till 80 cm nivå
0,73	82,0	0,095	10,6	35,5	Utglidningar ända upp till krönet
0,73	82,0	0,095	10,6	38,0	Utglidningar ända upp till krönet. Halva krönet rasat
0,76	85,0	0,10	11,1	40,0	Utglidningar sker kontinuerligt
0,77	86,0	0,10	11,1	41,0	Stor utglidning och dammen överströmmas

Figur 2.5 Överst visas en skiss av utglidningarnas form för 0,90m höga dammen och tabellen därunder beskrivs iakttagelser när vattenståndet höjs



① Uppströms vattennivå då försöket avbröts

② Profil efter det att försöket avbrutits

Uppströms vattenstånd		Nedströms vattenstånd		Flöde	Beskrivning
m	%	m	%	l/s·m	
0,64	47,4	0,120	8,9	-	En mindre sättning på 27 cm nivå
0,81	60,0	0,140	10,3	27,3	Stor sättning på hela bredden i mitten av slänten ända upp till 73 cm nivå
0,85	63,0	0,145	10,7	29,3	Stor utglidning under en tid av 30-40 sekunder. Slänten på högra sidan skadad upp till 93 cm nivå
0,86	63,7	0,150	11,1	-	Ny större sättning på nivå 60 cm och lägre
0,90	66,7	0,150	11,1	33,3	Stor sättning först på högra sidan sedan på vänstra sidan upp till 117 cm
0,925	68,5	0,160	11,9	35,3	Sättningar på olika ställen i det tidigare skadade området
0,96	71,1	0,165	12,2	38,7	Utglidning nästan upp till dammkrönet
0,98	73,0	0,170	12,6	-	Utglidning ända upp till dammkrönet på höger sida
0,995	73,5	0,180	13,3	41,7	En tredjedel av dammkrönet rasat
1,030	76,3	0,180	13,3	45,3	Ras med jämna mellanrum speciellt på den högra dammhalvan
1,04	77,0	0,180	13,3	46,7	Stor utglidning på högra sidan som efterföljs av en kontinuerlig nedbrytning av slänten
1,03	76,3	0,180	13,3	46,7	Överströmning

Figur 2.6 Överst visas en skiss av utglidningarnas form för 1,35 m höga dammen och tabellen därunder beskrivs iakttagelser när vattenståndet höjs

2.4 Utvärdering av genomströmningsförsöken

Det i litteraturen beskrivna sambandet mellan stabil stenstorlek d [m] i en genomströmmad stenfyllning och flöde per breddenhet q [$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$], släntlutning, I , brukar skrivas $d = k \cdot q^{2/3} \cdot I^{7/9}$, jämför t ex referens [5] och [6]. Dammens höjd är inte med i sambandet i detta traditionella sätt att beskriva stabiliteten.

Vid utvärderingen av försöken vid Älvkarlebylaboratoriet fann man att dammens höjd hade en inverkan på stabiliteten. Försöken med en modellfamilj med olika höjd men med samma utformning och samma material visade att en hög damm klarade en högre vattenföring utan skador än en låg damm.

För den 0,45 m höga dammen inträffade vid 80% fyllningsgrad och $q = 13,5$ l/s·m ”sättning på högra halvan upp till 23 cm nivå och vid 88% fyllningsgrad och $q = 17$ l/s·m ”en något större utglidning i mitten och vänster sida upp till nivå 34 cm” enligt försöksprotokollet.

För den 0,9 m höga dammen inträffade vid 68 fyllningsgrad och $q = 23$ l/s·m ”större sättningar på 30-50 cm nivå” enligt försöksprotokollet.

För den 1,35 m höga dammen inträffade vid 63% fyllningsgrad och $q = 33$ l/s·m ”stor utglidning under en tid av 30-40 s. Slänten på höger sida skadad upp till 93 cm nivå” enligt försöksprotokollet.

Om man jämför vattenföring vid totalt ras för 0,9 m dammen och 1,35 m dammen finner man att det inträffar för $q = 41$ l/s·m respektive 47 l/s·m.

Tendensen är tydlig att en större damm vid de provade förhållandena klarar en högre vattenföring än en lägre vid samma skada. Detta tillsammans med skadornas utveckling som utglidningar och inte erosion gör att man i detta fall inte kan bestämma nedströmssläntens förmåga att tåla genomströmmande vatten från stenstorleken vid dammtån, jämför avsnitt ”2.2 Tidigare studier” ovan. Brottförloppet, som i detta fall kunde studeras i modellförsöken, utgör ett geotekniskt stabilitetsproblem och behöver utvärderas med ett geotekniskt verktyg, vilket beskrivs i det följande.

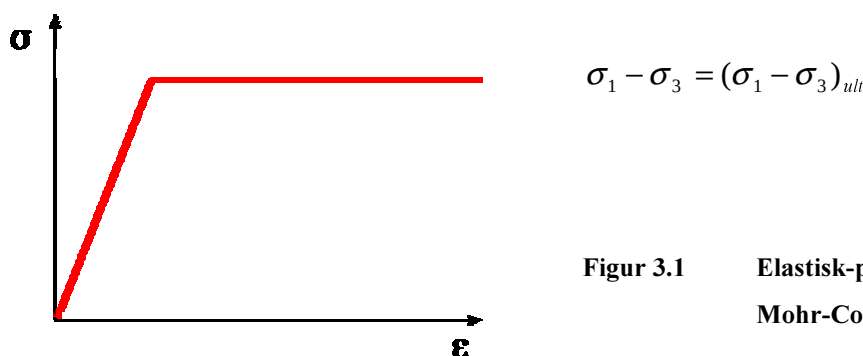
3 Finita Elementberäkningar

3.1 Allmänt

De ovan beskrivna fysiska modellförsöken som utfördes på Älvkarlebylaboratoriet har varit grunden för den matematiska modellen enligt finita elementmetoden som använts för att analysera problemet. De numeriska beräkningarna har utförts med finita element programmet Plaxis version 7.0, som släpptes ut på marknaden för kommersiellt bruk i april 1998.

Det observerade brottförloppet i modellförsöken med utglidning kunde jämföras med mönstret som beräknades med Plaxis-modellen. Jämförelsen visade mycket god överensstämmelse mellan observationer i den fysiska modellen och det beräknade mönstret av deformationer i finita elementberäkningen.

Mohr-Coulombs materialmodell för elastiskt-plastiskt material användes för att simulera egenskaperna för stenmaterialet (16-32 mm). När deviatorspänningen överstiger ett definierat brottvärde inträffar plastisk deformation enligt Mohr-Coulomb modell, jämför **figur 3.1**. Denna enkla modell valdes eftersom inga laboratorieförsök genomfördes.



Figur 3.1 **Elastisk-plastisk modell enligt Mohr-Coulomb**

Med den förenklade använda materialmodellen tas således inte hänsyn till att skjuvhållfastheten för sprängsten (eller grova gruset som användes i modellen) inte ökar linjärt med deformationen utan kurvan är krökt och skjuvhållfastheten är i verkligheten mycket hög vid låga normalspänningar, vilket har visats i många undersökningar. De parametrar som användes vid beräkningarna listas i följande tabell:

Tabell 3.1 Materialparametrar använda i finita elementberäkningen

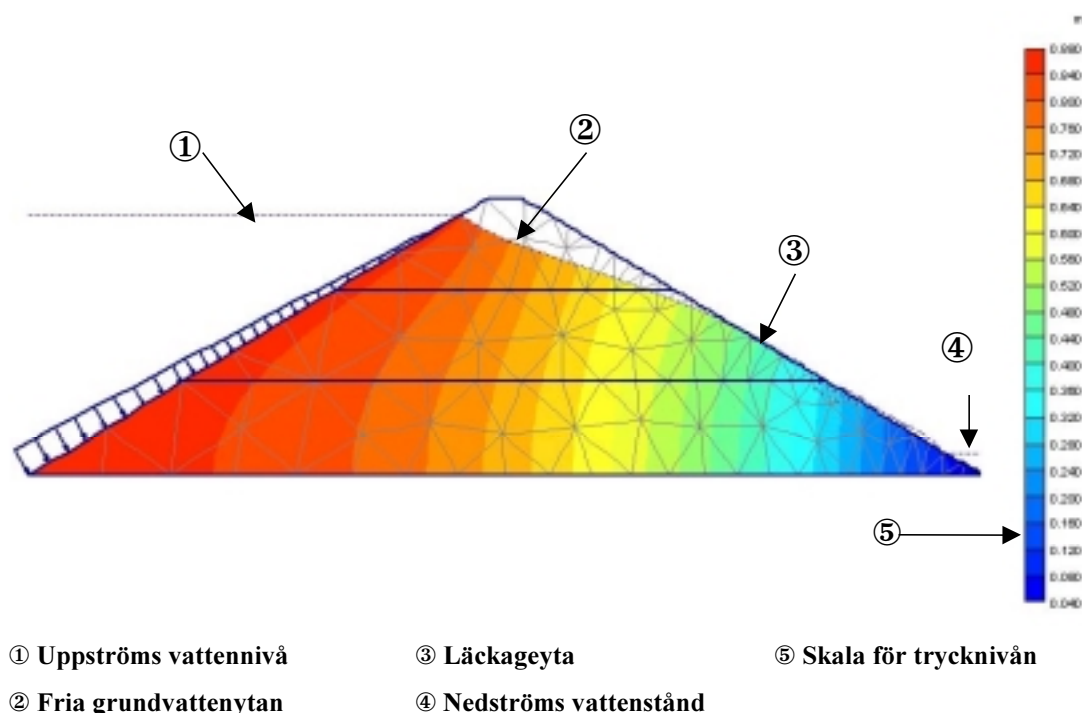
Parameter		Enhet	Värde
E	Elasticitetsmodul	kN/m ²	5000
ν	Poisson's tal	-	0.25
c	Kohesion	kN/m ²	0
Φ	Friktionsvinkel	grader °	45
Ψ	Dilatansvinkel	grader °	0
γ _{dry}	Torr densitet	kN/m ³	18
γ _{sat}	Vattenmättad densitet	kN/m ³	20

I Plaxis-modellen bestäms grundvattenströmningen av Laplace ekvation och Darcy's lag. Med ledning av resultaten från de fysiska försöken sattes hydrauliska konduktiviteten vid beräkningarna till 0,5 m/s. Detta är också en förenkling eftersom flödet delvis är turbulent. Den matematiska modellen bedöms dock vara tillräcklig för att kunna bestämma vattentrycken i utströmningsområdet vilka påverkar deformationerna i det aktuella partiet.

Beräkningarna med Plaxis gjordes i följande steg:

- Banken byggdes upp i tre lager
- Vattennivån höjdes i steg, 33, 44, 56 and 94 % av full höjd
- Den fria grundvattenytan beräknades för varje steg
- Deformationerna orsakade av vattnet (på grund av förändringarna i spänningarna) beräknades för varje vattenstånd

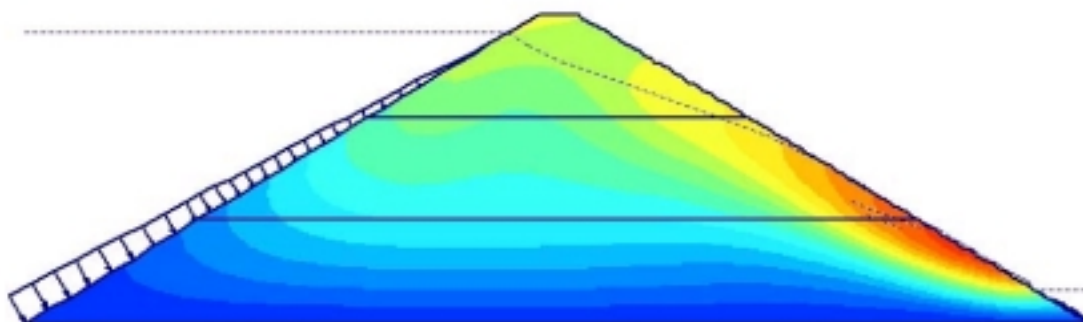
Beräkningsmodellen framgår i princip av **figur 3.2**.



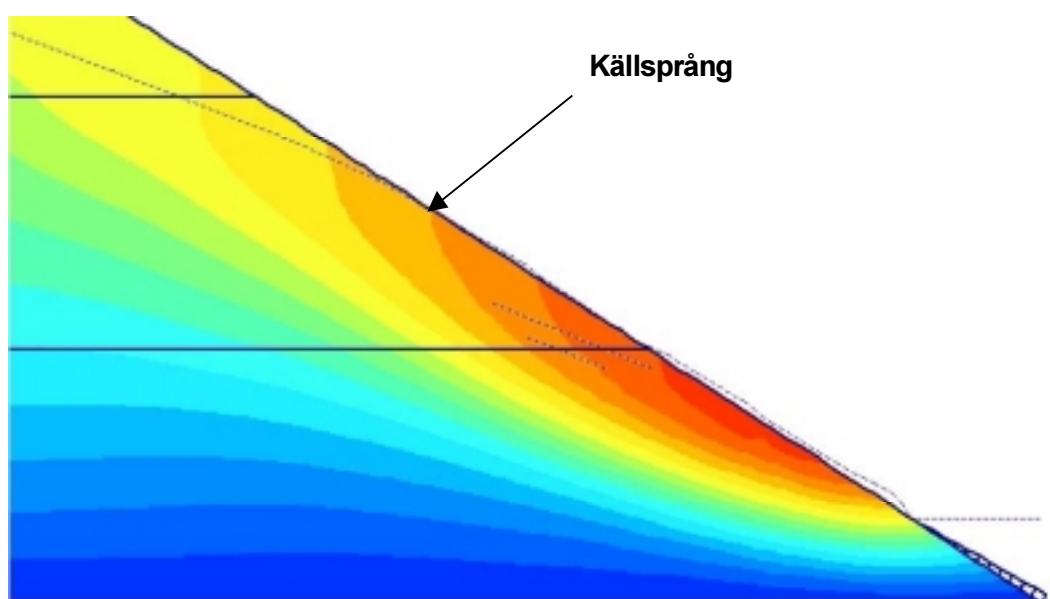
Figur 3.2 Beräkningsmodell och konturlinjer för grundvattentryck

3.2 Beräkningsresultat

Resultatet från beräkning av deformationerna i slutskedet av dämningen för den lägsta dammhöjden 0,45 m framgår av **figur 3.3**. Deformationerna i utströmningsområdet visas i detalj i **figur 3.4**. Den mörkblå färgen indikerar de minsta deformationerna och den röda färgen de största deformationerna. Det framgår av beräkningarna på ett tydligt sätt att de största deformationerna inträffar straxt under källsprånget, dvs den punkt där den fria grundvattenytan når nedströmsslänten.

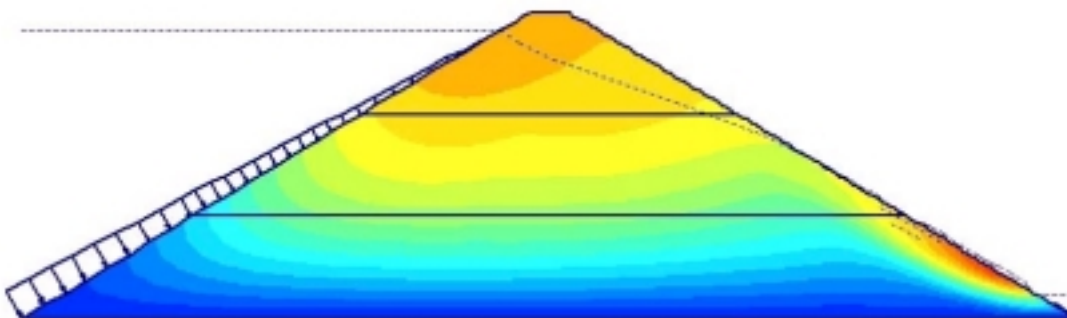


Figur 3.3 Konturlinjer för deformationer (damm höjd 0,45 m, vattenstånd 0,425 m)

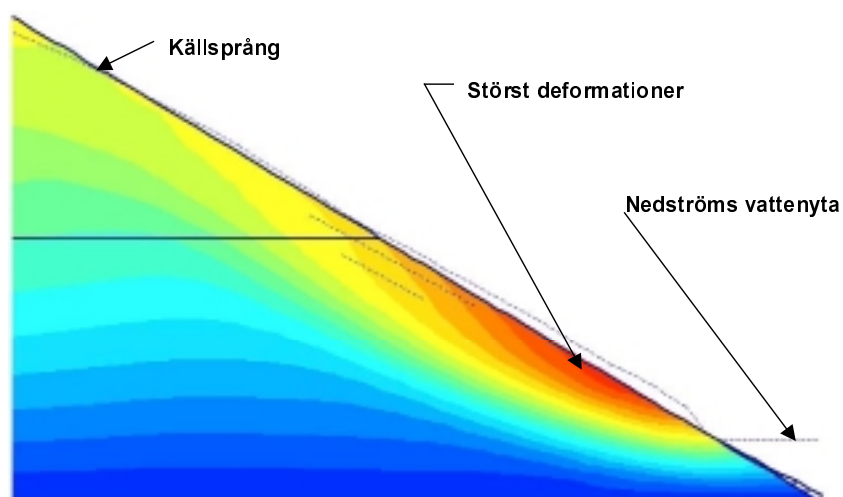


Figur 3.4 Detalj av figur 3.3 med konturlinjer för deformationer i utströmningsområdet

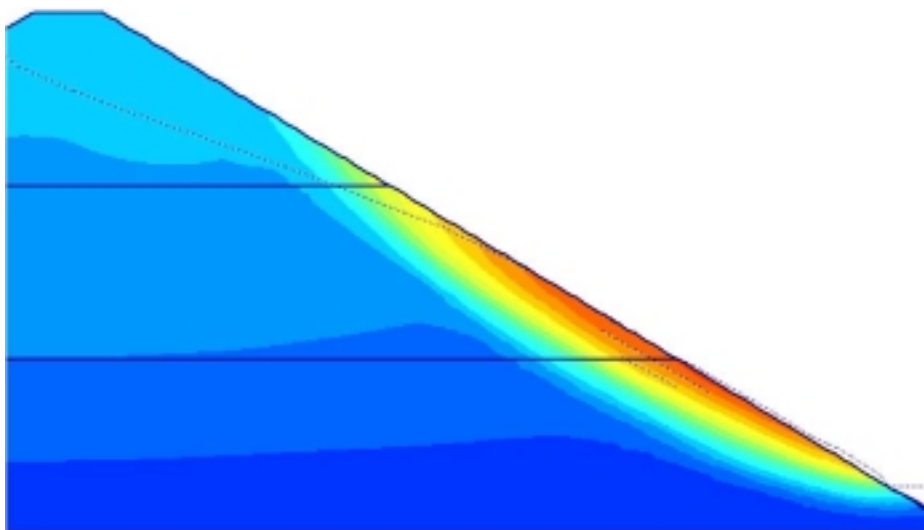
Motsvarande resultat erhöles vid beräkningarna för dammhöjden 0,9 och 1,35 m. Deformationerna för dammhöjden 0,9 m framgår av **figur 3.5** med en detalj av nedströmsområdet i **figur 3.6**. Den högsta dammhöjden 1,35 m visar också motsvarande mönster för deformationer vid dämningens slutskede, jämför **figur 3.7**.



Figur 3.5 Konturlinjer för deformationer (damm höjd 0,90 m, vattenstånd 0,85 m)

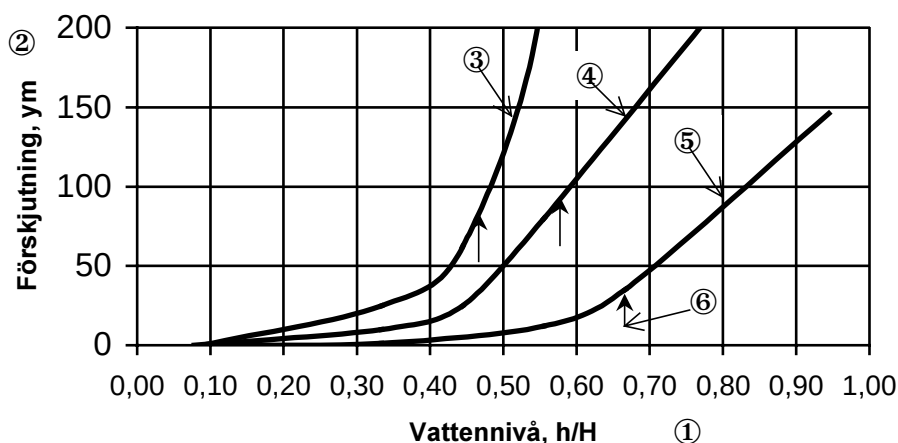


Figur 3.6 Detalj av figur 3.5 med konturlinjer för deformationer i utströmningsområdet



Figur 3.7 Konturlinjer för deformationer (damm höjd 1,35 m, vattenstånd 1,275 m)

Från finita elementberäkningarna kan utvecklingen av maximala deformationerna vid nedströmsslänten studeras för de olika dammhöjderna då vattenståndet höjs i magasinet. Förskjutningarna som funktion av uppströms vattenstånd framgår av **figur 3.8**.



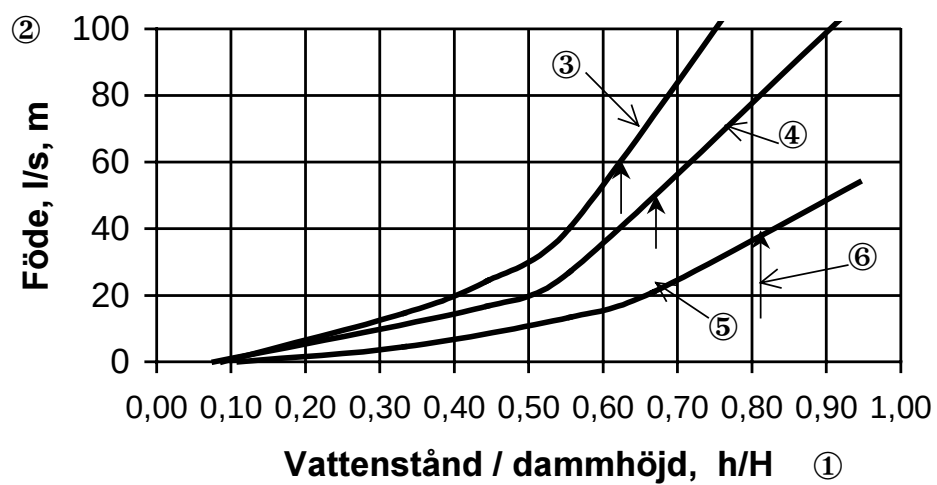
- | | |
|--------------------------------|--|
| ① Vattennivå / dammhöjd | ④ Dammhöjd 0,90 m |
| ② Förskjutning i μm | ⑤ Dammhöjd 0,45 m |
| ③ Dammhöjd 1,35 m | ⑥ Vattennivå då rörelse först noterades i fysiska modellen |

Figur 3.8 Förskjutning beräknade i FEM-beräkningen som funktion av fyllningshöjden

Från figur 3.8 framgår att deformationerna är små vid små fyllningshöjder, medan de accelererar vid fyllningshöjder större än 0,4 till 0,6 av dammhöjden. Det lägre värdet gäller för 1,35 m dammhöjd och det högre värdet för dammhöjden 0,45 m.

I figuren har också markerats vid vilken uppströms vattennivå som först observerades rörelser i den fysiska modellen, jämför tabellerna i figur 2.4 till 2.6. En god överensstämmelse kan noteras mellan vattennivån för accelererande rörelser i matematiska modellen och vattennivån för första rörelsen som observerades i den fysiska modellen.

I Plaxis-modellen bestämdes också vattenföringen med det förenklade antagandet om laminärt flöde och hydrauliska konduktiviteten 0,5 m/s. Det beräknade flödet med ökande fyllningsgrad framgår för de tre dammhöjderna av **figur 3.9**. I figuren har också markerats den fyllningsgrad då större rörelser inträffade i den fysiska modellen, dvs fyllningsgraden ca 80, 68 och 63% för dammhöjderna 0,45, 0,90 respektive 1,35 m. Absolutbeloppen på beräknade läckvattenflöde i figuren är direkt proportionellt mot antagen hydraulisk konduktivitet för materialet i modellen. Det kan här dock noteras att de beräknade flödena, på samma sätt som i den fysiska modellen, har en liknande tendens att öka med dammhöjden.



① Vattennivå / dammhöjd

④ Dammhöjd 0,90 m

② Flöde i l/s, m

⑤ Dammhöjd 0,45 m

③ Dammhöjd 1,35 m

⑥ Vattennivå då "större rörelser" noterades i fysiska modellen

Figur 3.9 Beräknat flöde i FEM-beräkningen som funktion av fyllningshöjden

4 Diskussion och jämförelse med litteraturuppgifter

4.1 Utglidning

Brottförloppet vid modellförsöken vid Älvkarlebylaboratoriet har kunnat simuleras med finita elementberäkningen med hjälp av dataprogrammet Plaxis. Brottet sker genom utglidning av fyllningen i nedströmsslänten. Deformationen börjar i släntytan närmast nedströms källsprånget, dvs där grundvattenytan mynnar ut på slänten. Faktorer som påverkar brottförloppet är materialets friktionsvinkel, släntlutningen och vattentrycken i utströmningsområdet.

Brottförloppet med utglidning finns beskrivet av t ex M. A. Toledo, jämför referens [2] och [3]. Säkerheten mot utglidning, dvs ”mass sliding”, anges där kunna beräknas med följande förhållande:

$$F = \frac{1}{\gamma_{sat}} \left(\gamma_{sat} - \frac{\beta \cdot \gamma_w}{\cos^2 \alpha} \right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

där F = säkerhetsfaktor mot utglidning

γ_{sat} = vattenmättad densitet

γ_w = densitet för vatten

α = vinkel för nedströmsslänten i förhållande till horisontalen

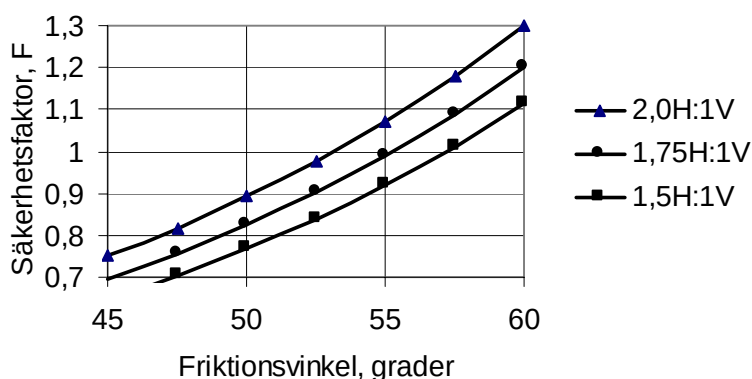
β = upptrycksfaktor

ϕ = friktionsvinkel för materialet

Upptrycksfaktorn β anges enbart bero på vattentrycken i utströmningsområdet och variera enligt nedanstående tabell:

Släntlutning	Upptrycksfaktor β
1,50	0,79
1,75	0,91
2,00	0,99

Säkerhetsfaktorns variation med materialets friktionsvinkel kan härigenom beräknas för olika släntlutningar enligt följande diagram.



Figur 4.1 Säkerhetsfaktorn mot utglidning som funktion av släntlutning (n) och friktionsvinkeln, enligt [3].

Från diagrammet kan konstateras att det behövs en friktionsvinkel av minst 53, 55 och 57 grader hos materialet för att slänten skall vara stabil mot utglidning då släntlutningen är 2,0H:1V och 1,75H:1V respektive 1,5H:1V.

4.2 Erosion

Dammtån vid nedströms stödfyllnings anslutning till grundläggningen behöver dimensioneras för att inte erodera på grund av eventuellt utströmmande vatten i samband läckage eller oavsiktlig överdämning av dammens tätning.

Solvik har angivit följande samband mellan tåstenens storlek som funktion av utströmmande flöde och vinkeln mellan släntlutningen och horisontalplanet, jämför [5] och [6].

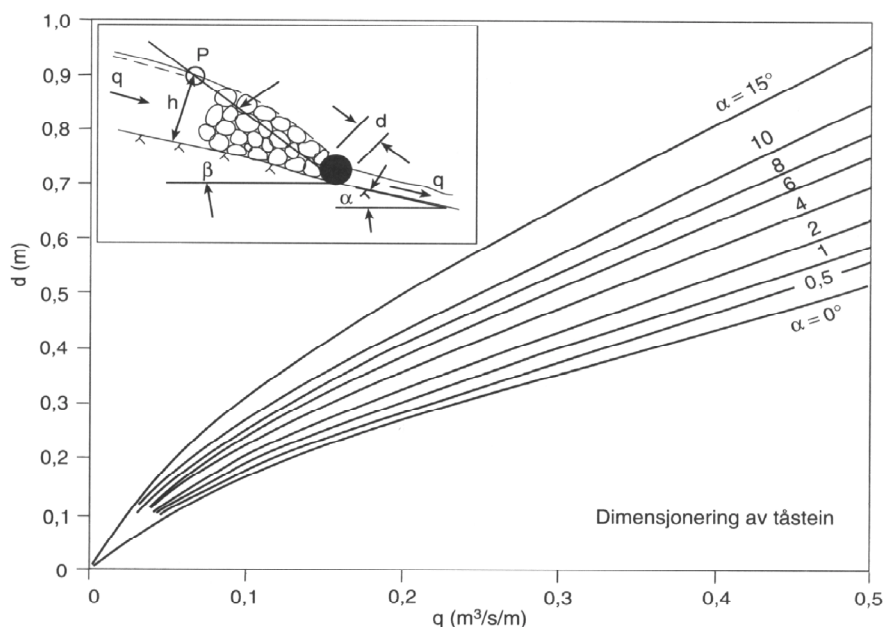
$$d = 1,5 \cdot q^{2/3} \cdot (\sin \beta)^{7/9}$$

där d = erforderlig stenstorlek

β = vinkeln mellan slänt och horisontalplanet

(m) = utflöde (m^3/s , m)

Solvik har vidare åskådliggjort ovanstående samband i diagramform där även införts undergrundens lutning mot horisontalplanet, (α), jämför **figur 4.2**.

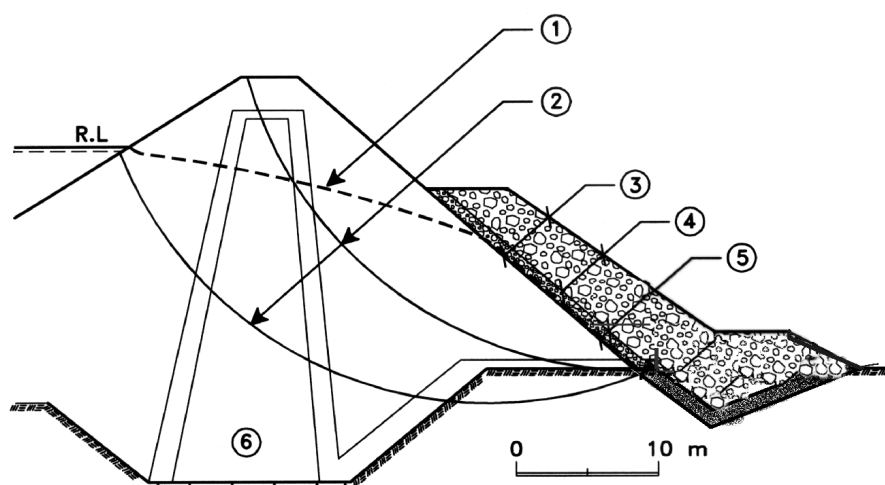


Figur 4.2 Erforderlig storlek hos "tåstenen" som funktion av utströmmande vattenflödet enligt Solvik [6]

4.3 Dimensionering för läckage

I kraftindustrins riktlinjer för dammsäkerheten RIDAS krävs, som ovan nämnts, att dammar i konsekvensklass 1 skall tåla ett möjligt läckage som dammen kan tänkas bli utsatt för under sin livstid, jämför [4].

En bank kan läggas ut mot nedströmsslänten om dammens motstånd för att tåla ett extremt läckage behöver ökas. Banken dimensioneras då dels för att motstå utglidningar, dels ha tillräckligt stora stenstorlek för att undvika erosion. Principen för utformning av en sådan bank framgår av **figur 4.3**.



- ① Teoretisk tänkt grundvattenyta vid extremt läckage
- ② Exempel på glidytor för dimensionering av "utglidning"
- ③ Stödbank

- ④ Sprängsten
- ⑤ Grovfilter

Figurer 4.3 Stödbank längs mot nedströmsslänten för att motstå "utglidning" och "erosion" av dammtån i samband med ett eventuellt extremt läckage

För dammar i konsekvensklass 1A och 1B behöver tillses att stabiliteten för glidytor är minst 1,0 i samband med dimensionerande läckage. Vidare behöver materialet i dammtån väljas så grovt att det säkert tål utläckande läckage utan att erodera.

5 Slutsatser

För en fyllningsdamm där nedströms stödfyllning utgörs av ett homogent material behöver nedströmsslänten och dammtån dimensioneras både mot "utglidning" och säkras så att den har tillräckligt "erosionsmotstånd".

Det första brottförloppet med utglidning bestäms av geotekniska parametrar som friktionsvinkeln hos fyllningsmaterialet, släntlutningen och vattentrycket i fyllningen. Det andra brottförloppet med erosion bestäms av hydrauliska parametrar som utströmmande vattenflöde, stenstorlek för "tåstenen" och lutningen på nedströmsslänten.

För vanliga släntlutningar och stödfyllning av "jord" t ex grus med en friktionsvinkel lägre än ca 50 grader kommer utglidning i första hand att bli dimensionerande, jämför avsnitt 4.1 ovan.

För stenfyllningsdammar med stödfyllning av sprängsten, där friktionsvinkeln vid små överlagringstryck kan vara mycket hög, kan nedströmsslänten oftast tåla ett utströmmande vattenflöde utan att glidytor och partier av slänten glider ut. Tåstenens förmåga att tåla erosion blir härigenom bestämmande för möjligt utströmmande vattenflöde, jämför avsnitt 4.2 ovan.

Om dammens motstånd behöver ökas för att tåla ett extremt läckage kan en bank läggas ut mot nedströmsslänten. Banken dimensioneras då dels för att motstå utglidning vid en tänkt utströmning av vatten i slänten, dels för att motstå erosion vid vattnets utströmning vid dammtån.

6 Referenser

- [1] A Linford, D H Saunders "A hydraulic investigation of through and overflow rockfill dams", BHRA, 1967.
- [2] M.A. Toledo Municio, "Embankment Dams Slip Failure due to Overtopping", Q.75, R.24, ICOLD, Florence 1997.
- [3] M.A. Toledo, "Safety of Rockfill dams subject to overtopping", Dam Safety, Berga (ed.)
- [4] RIDAS, Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Kapitel 3.2, Fyllningsdammar Tillämpningsanvisningar, Remissutgåva 1999-11-01.
- [5] Solvik Ø, "Safe Remedies for Leaking Embankment Dams", ICOLD, Q.52, R.78, Rio de Janeiro, 1982.
- [6] Solvik Ø, "Stenfyllningsdammars stabilitet vid genomströmning", VASO dammkommittés rapport nr 17, 1995. Sherard, J. L., et al. - "Basic Properties of Sand and Gravel Filters", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, May 1985.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se