

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Fyllningsdammars motståndskraft mot överspolande vågor

Rapport 99:35

Fyllningsdammars motståndskraft mot överspolande vågor

Elforsk rapport 99:35

Fyllningsdammars motståndskraft mot överspolande vågor

-- --

Per Vallander



Sammanfattning

Föreliggande utredning avser att klarlägga kraven på stödfyllningen i fyllningsdammars krön och nedströmsslänt för att motstå erosion p g a överspolande vågor. Studien avser härmed att också ge en indikation av hur materialet i dammkrönet och stödfyllningen påverkar kravet på fribord.

Ett underlag för bedömning av erforderligt minsta fribord fås genom att beräkna mängden vatten som förs över dammkrönet p g a överspolande vågor samt stabiliteten hos dammkrönet mot erosion av den överspolande vattenmängden. Stabiliteten hos dammens nedströmsslänt beräknas med utgångspunkt från den vattenmängd som p g a överspolande vågor strömmar över och genom dammkrönet till nedströmsslänten.

En första studie avseende överspolning och genomströmning i krönet hos fyllningsdammar och krav på stödfyllningen gjordes på uppdrag av VASO dammkommitté år 1995, Ref [1]. Det antydde i studien att marginaler kunde finnas i reglerna för dimensionering av fribord på fyllningsdammar med krön och slänt av erosionssäker fyllning. I studien konstaterades dock att beräkningen av överspolad vattenmängd gav påtagligt osäkra resultat.

Elforsk gav år 1997 i uppdrag åt VBB Anläggning att genomföra föreliggande utredning med syfte att upprätta ett underlag för noggrann bestämning av erforderligt fribord för fyllningsdammar, så att överspolande vågor ej skulle medföra erosion av dammkrön och nedströmsslänt.

Delft Hydraulics, Nederländerna, engagerades för att undersöka och föreslå beräkningssamband för sådan bestämning, och för att utföra simuleringar med datorbaserade numeriska modeller av våguppspolning, vågöverspolning och genomströmning av vatten i krönet på fyllningsdammar. Materialegenskaper och geometrier valdes efter typiska förhållanden för fyllningsdammar i Sverige. Dammarnas fribord förutsattes vara 3,0 m resp 2,0 m, Figur 3.1 och 3.2. För bestämning av vågstorlek förutsattes dammagasinets storlek medföra effektiva stryklängder upp till 5 km.

Uppspolningshöjden för vågor som sköljer upp på dammfronten har simulerats och resultaten har jämförts med motsvarande värden beräknade med tillgängliga beräkningssamband. Ett samband enl van der Meer, ekv (3.1) och (3.2), gav resultat i nära överensstämmelse med resultaten från simuleringarna. Efter omformning, ekv (4.1) och (4.2), och jämförelse med sambandet enligt nuvarande anvisningar, ekv (5.1), dras slutsatsen att nuvarande praxis i Sverige för beräkning av vågors uppspolningshöjd inte bör ändras.

Med vågöverspolning avses att vatten från vågor som sköljer upp på dammfronten når upp på dammkrönet. Vågöverspolning har simulerats i syfte att bestämma motsvarande vattenflöde över dammens krön. För simuleringen krävdes vissa förenklade antaganden avseende fyllningsmaterialet i dammkroppen. Ett beräkningssamband enligt van der

Meer för beräkning av medelflödet över krönets framkant, ekv (3.3) - (3.5), gav resultat i nära överensstämmelse med resultaten från simuleringarna. Simuleringarna visade att medelflödet över krönets bakkant av överspolande vågor är försumbart vid överdämningar upp till ca +1,5 m (d v s vattennivå i dammreservoiren lika med 1,5 m över dämningssgränsen). Vad gäller de maximala momentana flödena över dammkrönets framkant visade simuleringarna att de kan vara mer än ca 1 000 ggr större än flödet i medeltal för överdämningar upp till ca +1,0 m. För den högsta undersökta överdämningen, nämligen +2,5 m, är motsvarande förhållande ca 30 ggr. För de maximala momentana flödena finns såvitt känt inget beräkningssamband.

Det är heller inte känt om det finns något analytiskt samband för beräkning av våginducerade vattenflöden inuti krönet över tät kärnan på en fyllningsdamm. Någon jämförelse har därför inte kunnat göras av simulerade resultat för genomläckning med resultat från beräkningssamband. Dock har kunnat konstateras att för överdämningar upp till tät kärnans krönnivå ger van der Meers samband för beräkning av medelflödet över dammkrönets framkant p g a vågöverspolning, ekv (3.3) - (3.5), resultat i någorlunda överensstämmelse med simulerade resultat vad gäller medelflöden i dammkrönet över tät kärnan. Simuleringen visade att kvoten mellan det maximala momentana flödet och medelflödet är mindre för flödet i dammkrönet än för flödet över dammkrönet p g a vågöverspolning. Uppenbarligen sker en viss utjämning av flödet inuti dammkrönet. Det inre flödet i dammkrönet orsakas huvudsakligen av flera på varandra följande överspolande vågor, vilka medför att en inre grundvattenyta byggs upp under en längre tid. På tät kärnans baksida kan inverkan av enstaka vågor knappt märkas.

Motståndsförmågan hos krönet på fyllningsdammarna mot erosion av överspolande vågor har såvitt känt inte tidigare undersökts. Orsaken härtill torde vara att man vanligen inte tillåter att fyllningsdammarna överspolas. I föreliggande utredning har gjorts en jämförelse med en metod för dimensionering av sten på krönet av fångdammarna. Ett beräkningssamband för dimensionering av sten på dammkrönet mot erosion av överspolande vågor har föreslagits, ekv (3.6). Det maximala momentana flödet av vågöverspolning över bakkanten på dammens krön är dimensionerande. Simuleringarna av maximala momentana flöden över krönets bakkant av vågöverspolning visade att kritiska värden för begynnande erosion av krönmaterialen överskrids vid överdämningar över ca +1,0 m med gjorda förutsättningar. Det är dock tveksamt om man kan tillåta överdämning ur denna synpunkt, eftersom permeabiliteten i dammens krön måste vara garanterad under hela dammens livslängd.

Från tidigare undersökningar rörande stabiliteten hos branta utskov har ett samband härletts för dimensionering av sten på fyllningsdammars nedströmsslänt med avseende på erosion av strömmande vatten, ekv (3.7). Det maximala momentana inre flödet i dammkrönet förbi tät kärnans nedströmsskant föreslås vara dimensionerande. I detta sammanhang måste beaktas inverkan av topografin i området för dammen, eftersom den utströmmande mängden vatten beror på hur vattnet leds mot lågpunkter i terrängen. Förutsatt en 10-faldig koncentration av flödet skulle man kunna tillåta en överdämning ca +0,5 m med gjorda förutsättningar för en damm med krönnivå +3,0 m vid effektiva

stryklängder upp till ca 5 km. För en damm med krönnivå +2,0 m skulle överdämning inte vara tillåten.

Avslutningsvis görs ett försök till bedömning av nuvarande kunskapsnivå för bestämning av erforderligt fribord på fyllningsdammar. Två tänkbara principer för dimensionering tas också upp, nämligen:

Princip 1: Fribordet väljs så att överspolning av krönet eller att genomströmning i krönet ej uppstår.

Princip 2: Fribordet väljs så att genomströmning kan uppstå, men så att den blir kontrollerad och anpassad efter egenskaperna hos dammens fyllningsmaterial.

Det konstateras att utformning av dammar efter princip 2, så att det genom dammen strömmande vattnet p g a vågverkan blir begränsat till storlek efter vad dammen tål, kräver avancerade kunskaper om överspolning och strömning inuti dammen över tätkärnan p g a vågor.

På basis av en bedömning av nuvarande kunskapsnivå dras slutsatsen att dimensionering inte skall tillåtas enligt princip 2 ovan. Slutsatsen blir att fyllningsdammars fribord skall väljas så att överspolning av krönet eller strömning över tätkärnan inte uppstår. Nuvarande regler för dimensionering av fribord hos fyllningsdammar föreslås därför inte bli ändrade.

Summary

The present study has been made in order to clarify what is required of the fill in the crest and in the downstream slope of zoned earth or rock fill dams in order to resist erosion due to overtopping waves. Hereby the purpose of the study is also to give an indication of how the fill material in the crest and shoulders affects the need for free board.

A basis for assessment of necessary minimum free board is obtained by calculating the water flow over the dam crest due to overtopping waves and the dam crest's ability to resist erosion due to this flow. A basis for assessment of the downstream slope's ability to resist erosion is obtained by calculating the water flow from overtopping waves that flows over and through the crest to the downstream slope.

A first study of wave overtopping and water flow through the crest of fill dams, as well as of demands on the shoulder fill, was made for VASO Dam Committee in the year 1995, Ref. [1]. It was indicated in the study that there may be margins in the rules for design of free board of fill dams with crest and downstream slope made of erosion resistant materials. It was however stated that results from calculation of the overtopping discharge were unreliable.

In 1997 Elforsk commissioned VBB Anläggning to carry out the present study with the purpose of preparing a basis for accurate determination of necessary free board for fill dams, thus that overtopping waves would not cause erosion of the dam crest and downstream slope.

Delft Hydraulics, the Netherlands, were contracted to investigate and propose formulas for such determination, and to carry out verifying simulations with computer based numerical models of wave run-up, wave overtopping and internal water flow through the crest of fill dams. Material properties and geometries were chosen after typical conditions for zoned fill dams in Sweden. The free board was assumed to be 3.0 m and 2.0 m, respectively. For determination of wave size the dam reservoir size was assumed to correspond to effective fetches up to 5 km.

The wave run-up height on dam fronts has been simulated and the results have been compared with the corresponding values calculated with available formulas. A formula according to van der Meer, Eqs (3.1) and (3.2), gave results close to the results from the simulations. After conversion, Eqs (4.1) and (4.2), and comparison with the formula according to present design rules, Eq. (5.1), the conclusion is that present rules in Sweden for determination of wave run-up height should not be changed.

With wave overtopping is meant that water from waves, which run up on the dam front, advances up on the dam crest. Wave overtopping has been simulated in order to determine the corresponding discharge over the dam crest. For the simulation it was necessary to make certain simplified assumptions regarding the fill material in the dam body. A formula according to van der Meer for determination of the mean discharge

over the front of the crest, Eqs (3.3) - (3.5), gave results close to the results from the simulations. The simulations showed that the mean discharge over the crest back side due to overtopping waves is negligible for dam reservoir water levels up to +1.5 m (i.e. water level 1.5 m above design water level in the dam reservoir). The simulations also showed that the maximum instantaneous discharges over the crest front can be more than 1 000 times larger than the mean discharge for reservoir water levels up to +1.0 m. For the maximum reservoir water level considered, i.e. +2.5 m, the corresponding relation was about 30 times. As far as known there is no formula available for calculation of the maximum instantaneous discharge.

It is not known if there are any formulas available for calculation of wave induced internal flows through the crest over the dam core of fill dams. It has therefore not been possible to compare the results from simulations of internal flow with results from formulas. However, for reservoir water levels up to the crest level of the dam core the formula according to van der Meer for calculation of the mean discharge over the front of the crest due to wave overtopping, Eqs (3.3) - (3.5), provides results in certain conformity with simulated results as far as mean discharges through the dam crest over the dam core are considered. The simulations showed that the relation between the maximum instantaneous discharge and the mean discharge is smaller for the internal flow through the dam crest than for the discharge over the crest due to wave overtopping. There is apparently a certain levelling out of the flow inside the dam crest. The internal flow through the dam crest is mainly caused by several after each other coming overtopping waves, which cause an inner water table to be established after a certain time. On the back side of the core effects of individual waves can hardly be noticed.

The ability of crests of fill dams to resist erosion due to overtopping waves has as far as known not been investigated earlier. The reason for this is probably that fill dams are usually not allowed to be overtopped. In the present investigation a comparison has been made with a method for design of stone on the crest of cofferdams. A formula for design of stone on the dam crest to resist erosion due to overtopping waves has been proposed, Eq. (3.6). The maximum instantaneous discharge due to wave overtopping past the back side of the crest will be decisive for the stone size. The simulations of maximum instantaneous discharges past the back side of the dam crest due to wave overtopping showed that critical values for erosion of the crest material will be reached for reservoir water levels above approximately +1.0 m considering the assumptions made. It can however be questioned if increased reservoir water level can be allowed from this point of view, since the permeability of the dam crest must be safeguarded during the entire lifetime of the dam.

From earlier investigations of the stability of erosion protection on steep chutes a formula has been proposed for design of stone on the dam downstream slope to resist erosion due to water flow, Eq. (3.7). The maximum instantaneous internal discharge through the crest over the back side of the core of the dam is proposed be used for determination of the necessary stone size. In this connection the influence of the topography of the dam area must be considered, since the flow discharge on the

downstream slope will depend on how the water is transported to low areas in the terrain. Provided a 10-fold concentration of the flow, an increase of the reservoir water level to +0.5 m would be allowed for a dam with crest level +3.0 m fetch lengths up to 5 km considering the assumptions made. For a dam with crest level +2.0 m an increase of the reservoir water level would not be allowed in this regard.

Finally an attempt is made to assess the present level of knowledge for determination of the required free board of fill dams. Two possible principles for design are also discussed, viz.:

- Principle 1: The free board is determined thus that overtopping of the dam crest or internal flow through the dam crest will not appear.
- Principle 2: The free board is determined thus that internal flow through the dam crest can appear, but so that the flow will be controlled and adapted to the properties of the fill of the dam.

It is stated that design of dams according to principle 2 above, thus that the wave induced internal flow through the dam crest will be limited after what the dam can take, will require advanced and detailed knowledge about dam material properties and erosion resistance, as well as of overtopping and internal flow through the dam crest due to waves.

On the basis of the assessment of the present level of knowledge in this respect the conclusion is that design of necessary free board shall not be allowed according to principle 2 above. From this follows that the free board of fill dams shall be designed thus that overtopping of the dam crest or internal flow in the dam crest will not appear. It is therefore suggested, that the present rules for design of the free board of fill dams shall not be changed.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	UPPDRAGET	1
1.3	ORGANISATION	2
2	STUDIENS GENOMFÖRANDE	3
3	UNDERSÖKNINGAR	4
3.1	ALLMÄNT.....	4
3.2	DATORPROGRAM FÖR SIMULERING	4
3.3	PARAMETERVAL	6
3.4	VÅGSTORLEK	8
3.5	VÅGUPPSPOLNING	8
3.6	VÅGÖVERSPOLNING	10
3.7	INRE VATTENFLÖDE	14
3.8	ERFORDERLIG STENSTORLEK PÅ DAMMENS KRÖN	18
3.9	ERFORDERLIG STENSTORLEK PÅ DAMMENS NEDSTRÖMSSLÄNT	20
4	DIMENSIONERINGSUNDERLAG	21
4.1	ALLMÄNT.....	21
4.2	VÅGOR.....	21
4.3	VÅGUPPSPOLNING	21
4.4	VÅGÖVERSPOLNING	22
4.5	INRE VATTENFLÖDE	23
4.6	STENSTORLEK PÅ DAMMKRÖNET	24
4.7	STENSTORLEK PÅ DAMMENS NEDSTRÖMSSLÄNT	25
5	JÄMFÖRELSE AV RESULTATEN FRÅN UNDERSÖKNINGARNA MED BEFINTLIGA ANVISNINGAR.....	27
5.1	VÅGUPPSPOLNING	27
5.2	VÅGÖVERSPOLNING OCH INRE VATTENFLÖDE	27
5.3	STENSTORLEK PÅ DAMMKRÖNET	28
5.4	STENSTORLEK PÅ DAMMENS NEDSTRÖMSSLÄNT	28
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	29
7	REFERENSER.....	31
8	FIGURER	32
9	BILAGOR.....	33

1 Inledning

1.1 Bakgrund

År 1995 genomförde VBB Anläggning på uppdrag av VASO dammkommitté en studie, Ref [1], avseende krav på stödfyllningen i fyllningsdammars dammkrön, nedströmsslänt och nedströmstå för att motstå erosion av vatten från överspolande vågor. En avsikt med studien var att visa hur kravet på fribord påverkas av valet av material i dammkrön och stödfyllning.

Arbetet år 1995 omfattade inventering och värdering av teoretiska samband för beräkning av följande parametrar:

- Vattenflöde över krönet av fyllningsdammar p g a överspolande vågor
- Stabiliteten mot erosion för sten i krön, nedströmsslänt och nedströmstå av fyllningsdammar

Med beräkningsexempel för en typisk fyllningsdamm antydde, att det kan finnas marginaler i nuvarande regler för dimensionering av fribord på fyllningsdammar med krön och nedströmsslänt av erosionssäker fyllning.

Dock konstaterades i studien att beräkningen av överspolad vattenmängd gav påtagligt osäkra resultat. De befintliga beräkningsmetoderna avser vanligen överspolning av vågbrytare eller relativt täta strandvallar. Härigenom var det inte möjligt att bestämma hur mycket vatten som transporteras inuti dammkrönet över tätkärnan och sedan förs vidare till nedströmstån.

Det konstaterades också i studien att befintliga anvisningar avseende dimensionering av fyllningsdammar mot vågerosion bygger på resultat från undersökningar som samlats in från olika källor, och som ursprungligen kan ha avsett andra applikationer, t ex vågbrytare.

Det rekommenderades därför i studien från år 1995 att ett helhetsgrepp borde tagas vad gäller analysen av fyllningsdammars motståndskraft mot överspolande vågor. Således föreslogs att fysiska eller numeriska modellförsök skulle genomföras med utgångspunkt från verkliga förhållanden vad avser dammkroppens uppbyggnad och angripande vågor, och i vilka de relevanta parametrarna studerades i ett sammanhang.

1.2 Uppdraget

Elforsk uppdrog 1997-06-18 åt VBB Anläggning att genomföra en utredning i princip enligt förslaget nämnt ovan (Elforsk projekt 1206). Syftet med utredningen var att för fyllningsdammar upprätta ett underlag för noggrann bestämning av erforderligt fribord vid olika material i krön, nedströmsslänt och nedströmstå för att undvika erosion av överspolande vågor.

1.3 Organisation

Uppdragsledare på VBB Anläggning har varit Per Vallander. Åke Nilsson, Vattenfall Hydropower, har under sin tid som anställd vid VBB Anläggning medverkat vid uppläggningsundersökningen samt valet av dammgeometrier och -material.

VBB Anläggnings arbete har huvudsakligen bestått i att upprätta programmet för de numeriska simuleringarna, att värdera resultaten, att föreslå ett dimensioneringsunderlag samt att göra jämförelser med befintliga anvisningar.

Delft Hydraulics, Delft, Nederländerna har varit underkonsult åt VBB Anläggning med följande uppdrag:

- Utföra simuleringar med datorbaserade numeriska modeller
- Jämföra resultat från simuleringarna med resultat från beräkningsformler
- Föreslå metoder för dimensionering av erforderlig stenstorlek på dammkrön och nedströmsslänt

Uppdragsledare vid Delft Hydraulics har varit Gert Jan Akkerman. Simuleringarna vid institutet har genomförts av Marcel van Gent.

Hans Bergh vid avdelning vattenbyggnad, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, har följt och lämnat synpunkter på arbetet genom att tillsammans med VBB Anläggning deltaga i start- och avstämningssmöten med Delft Hydraulics.

Jonas Rundqvist vid VBB Anläggning har granskat rapporten och givit förslag till ändringar och kompletteringar.

2 Studiens genomförande

Studien har omfattat följande moment:

1. Numerisk simulering, med förutsättningarna anpassade efter typiska förhållanden för fyllningsdammar i Sverige, för att fastställa följande storheter:
 - Uppspolningshöjd på dammfronten p g a vågor
 - Vattenflöde över dammkrönet
 - Vattenflöde inuti dammkrönet över tätkärnan
2. Jämförelse av resultaten från simuleringarna med resultat från beräkningsformler
3. Analyser för att fastställa följande storheter:
 - Erforderlig stenstorlek på krönet för att undvika erosion
 - Erforderlig stenstorlek på nedströmsslänten för att undvika erosion
4. Upprättande av dimensioneringsunderlag på basis av undersökningarna
5. Jämförelse av resultaten med befintliga anvisningar

3 Undersökningar

3.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs och kommenteras de numeriska simuleringar och analyser som utförts vid Delft Hydraulics. Den kompletta rapporten från Delft Hydraulics, med mer utförliga beskrivningar, finns bifogad som **Bilaga 1**.

3.2 Datorprogram för simulering

3.2.1 Allmän beskrivning

Under senare år har datorbaserade numeriska modeller utvecklats för simulering av samspelet mellan vågor och strukturer. De numeriska modellerna utgör ett alternativ eller komplement till fysiska modeller, bl a eftersom inre flöden och viskösa effekter inte kan återges korrekt i fysiska modeller. Med numerisk modellering är det också möjligt att snabbt undersöka variationer och olika kombinationer av parametrar.

För de numeriska simuleringarna i detta uppdrag har använts datorprogrammen Odiflocs och Skylla utvecklade vid Delft Hydraulics.

Datorprogrammet Odiflocs är baserat på en endimensionell modell för datorbaserad simulering av förlopp när vågor träffar en struktur. Med en endimensionell modell avses att partikelhastigheterna i vågorna återges med medelhastigheten mellan vattenytan och sjöbottnen. Detta medför att en brytande våg modelleras som en nära vertikal vägg som rusar uppför en slänt. Den framrusande övre tungan på en brytande våg kan således inte simuleras i detalj. Programmet Odiflocs har utvecklats ytterligare vid Delft Hydraulics, så att det är möjligt att även få en tvådimensionell tolkning av de endimensionella resultaten.

Endimensionella modeller kan användas för simulering av tex följande fenomen:

- Våguppspolning, -nedspolning och -reflektion mot glatta, råa eller permeabla slänter
- Vågöverspolning och -transmission
- Inre flöden i vågbrytare eller dammar av sten
- Vågkrafter på block i vågbrytare
- Förändring av formen hos vågbrytare av sten under inverkan av vågor

Fördelarna med de endimensionella modellerna är:

- Användarvänlighet
- Inre flöden i strukturer och oregelbundna vågor kan modelleras
- Tvådimensionella resultat kan erhållas genom tolkning

Nackdelarna med de endimensionella modellerna är:

- Endimensionell representation av vågornas hastighetsfält, vilket medför att precisionen minskar i beskrivningen av förlopp med brytande vågor

Det mycket avancerade datorprogrammet Skylla beskriver flöden på basis av Navier-Stokes ekvationer. Med sådana modeller kan man korrekt simulera förlopp med brytande vågor på och i strukturer. Det är möjligt att modellera fria vätskeytor som t ex krönet på en brytande våg som kollapsar och slår i vattenytan framför vågen. Programmet Skylla kan beskrivas som en numerisk vattenränna i ett hydrauliskt laboratorium för försök med vågor, och som kan innehålla en tvådimensionell permeabel eller icke permeabel struktur, t ex en vågbrytare.

Navier-Stokes modeller kan användas för t ex följande bestämningar:

- Våguppspolning, -nedspolning och -reflektion mot glatta, råa eller permeabla tvådimensionella strukturer, antingen lutande eller vertikala
- Vågöverspolning och -transmission
- Inre flöden i vågbrytare eller dammar av sten
- Bestämning av tvådimensionella hastighetsfält i brytande eller icke brytande vågor

Fördelarna med Navier-Stokes modellerna är:

- Det är möjligt att fullständigt bestämma det tvådimensionella fältet av hastigheter, accelerationer och tryck i brytande eller icke brytande vågor
- De kan användas för ett stort antal applikationer avseende vågors verkan på strukturer

Nackdelarna med Navier-Stokes modeller är:

- Stigande luftbubblor kan ej beskrivas, t ex i samband med vågbrott
- Beräkningarna är tidskrävande även på mycket kraftfulla datorer

Eftersom de numeriska modellerna inte är verifierade för exakt de applikationer som behandlas i föreliggande undersökning, måste resultaten tolkas med viss försiktighet. Verifieringar har dock genomförts för andra applikationer. Dessa visar att de numeriska modellerna beskriver verkliga förhållanden mycket bra.

3.2.2 Begränsningar

Simuleringsprogrammet Odiflocs är uppbyggt med vissa förenklade antaganden, vilket medför att resultaten kan behöva tolkas för att få rätt uppfattning om noggrannheten. Förenklingarna i programmet Odiflocs är följande:

- Hydrostatiskt tryck förutsätts råda. Detta är en förenkling vid flöden där vertikala accelerationer uppträder. Så är fallet när vattenflödet genom ett dammkrön, efter att ha sköljt över tät kärnan, snabbt rinner nedför nedströmsslänten på dammen.
- Dammkroppen utanför tät kärnan förutsätts ha samma egenskaper i alla riktningar, d v s vara isotropisk. Tät kärnan modelleras separat som impermeabel. Stödfyllning, filter och erosionsskydd måste dock modelleras som ett och samma material.
- Beräkningar av infiltration och läckning görs med utgångspunkt från medelhastigheter i vertikalled.
- Permeabiliteten för stödfyllningen återges i modellen med ansatta värden på porositet och kornstorlek hos stödfyllningen.

Betydelsen av vissa av de nämnda begränsningarna kan vanligen uppskattas resonemangsvis, t ex kan betydelsen av att dammkroppen förutsätts vara isotropisk undersökas genom att jämföra resultaten från beräkningar med olika egenskaper för stödfyllningen. Betydelsen av andra begränsningar kan däremot vara svårare att fastställa.

Skylla är ett avsevärt mer avancerat simuleringsprogram än Odiflocs och har inte de nämnda begränsningarna vad gäller tryck och material. Med programmet Skylla kan man f n dock endast simulera monokroma vågor, d v s vågorna under en storm förutsätts ha konstant våghöjd och vågperiod.

3.3 Parameterval

3.3.1 Dammkroppens geometri

Två krönnivåer på dammar har beaktats, nämligen + 3,0 m resp + 2,0 m, varvid dämningens nivå förutsattes vara +/- 0. Krönbredden har varit 5,0 m och lutningen på stödfyllningen på uppströms- och nedströmsslänten 1:2. Tät kärnans krönnivå har förutsatts vara + 1,0 m resp + 0,5 m vid stödfyllningens krönnivå + 3,0 m resp + 2,0 m. Övriga valda geometriska förhållanden framgår av **Figur 3.1 och 3.2**. De undersökta dammgeometrierna valdes som typiska för svenska fyllningsdammar.

3.3.2 Vattenstånd

Tillfällig överdämning har förutsatts vara möjlig. Överdämningar från dämningens nivå +/- 0 i intervall om 0,5 m har beaktats. För den högsta beaktade dammen har överdämning till nivån + 2,5 undersökts, och för den lägsta beaktade dammen till nivån + 1,5 m, d v s till nivåer över tät kärnan för bägge typdamarna.

De ansatta magasinshöjderna vid överdämning har förutsatts inkludera vindnivellering och inverkan av atmosfärstrycket.

3.3.3 Vindhastighet och stryklängd

Storleken av de vågor som når dammen är en funktion av vindhastigheten och stryklängden, d v s den sträcka av dammagasinet över vilken vinden blåser. Här har följande parametervärden förutsatts gälla:

- Vindhastighet 25 m/s.
- Effektiv stryklängd från 3 km till 5 km för den högsta beaktade dammen och från 0,5 km till 2,5 km för den lägsta beaktade dammen.

Den valda vindhastigheten avser magasin i fjällterräng i kombination med dimensionerande flöde varvid överdämning är tänkbar.

3.3.4 Vågor

Vid simulering med programmet Odiflocs genererades vågor med varierande storlek enligt s k Jonswapspektrum, d v s som oregelbundna vågor, för att efterlikna verkliga vågor vid ett stormtillfälle. Varje simulering omfattade 500 vågor.

Vid simulering med programmet Skylla förutsattes monokroma vågor.

3.3.5 Materialparametrar

Materialparametrar för dammkroppens fyllning har förutsatts enligt **Tabell 3.1**.

Tabell 3.1 Valda typiska materialparametrar för dammkropp. Numrering enl Figur 3.1 och 3.2

	Jordart	Kornstorlek D_{50} (mm)	Graderings-tal D_{60}/D_{10}	Permeabilitet (m/s)	Kornform
1. Tätkärna	Morän	1,0	100	10^{-7}	-
2. Filter	Grusig sand	5,0	15	5×10^{-4}	-
3. Stödfyllning o krön	a) Sandigt grus	10 - 50	15	10^{-1}	Rundad
	b) Sten	50 - 100	20	-	Kantig/oregelbunden
4. Erosions- skydd	Sten	500 (krön +3,0) 300 (krön +2,0)	-	-	Kantig/oregelbunden
5. Filter	Sten	250 (krön +3,0) 150 (krön +2,0)	-	-	Kantig/oregelbunden

Som nämnts ovan i avsnitt 3.2.2 måste förutsättas för programmet Odiflocs att stödfyllning, filter och erosionsskydd är uppbyggda av ett och samma representativa material. Porositeten valdes till $n=0,35$ för stödfyllningen.

3.4 Vågstorlek

Vågornas storlek på dammagasinet har beräknats enligt **Ref [2]** och med förutsättningen att vindens varaktighet inte är begränsande. De använda kombinationerna av våghöjd och vågperiod framgår av **Tabell 3.2**.

Tabell 3.2 Våghöjder och -perioder beräknade enl Ref [2] och som använts i undersökningarna vid Delft Hydraulics. Vindhastighet 25 m/s.

Effektiv stryklängd (km)	Signifikant våghöjd, H, (m)	Signifikant vågperiod, T, (s)
0,5	0,49	1,72
1,5	0,85	2,48
2,5	1,10	2,94
3,0	1,20	3,13
4,0	1,39	3,44
5,0	1,55	3,70

I VASO dammkommittés rapport nr 10, **Ref [3]**, föreslås att storleken av vågor på dammagasin skall beräknas enligt en metod framtagen av Saville. För jämförelsens skull visas i **Tabell 3.3** värden på våghöjd och vågperiod beräknade med Savilles metod.

Tabell 3.3 Våghöjder och -perioder beräknade enl Ref [3]. Vindhastighet 25 m/s.

Stryklängd (km)	Signifikant våghöjd, H, (m)	Signifikant vågperiod, T, (s)
0,5	0,44	2,09
1,5	0,73	2,84
2,5	0,93	3,23
3,0	1,01	3,45
4,0	1,16	3,74
5,0	1,29	3,98

En jämförelse av värdena i Tabell 3.2 och 3.3 visar att med den här använda beräkningsmetoden fås större våghöjder men mindre vågperioder än med Savilles metod enl Ref [3]. Betydelsen för storleken av våguppspolning och vågöverspolning bedöms i föreliggande undersökning vara liten, eftersom skillnaderna i våghöjd resp vågperiod motverkar varandra i dessa avseenden.

3.5 Våguppspolning

Uppspolningshöjden definieras som den höjd mätt vertikalt från lugnvattenytan som vattnet når när en våg sköljer upp på t ex en dammfront.

Våguppspolning har simulerats med programmet Odiflocs och beräknats med analytiska formler enl van der Meer, **Ref [4]**, resp enl CUR, **Ref [5]**.

Överensstämmelsen mellan uppspolningshöjderna beräknade enl van der Meer resp simulerade med Odiflocs var god. Resultatet erhållet enl CUR bedömdes vara sämre och denna metod förkastades därför, se **Tabell 3.4**.

Tabell 3.4 Uppspolningshöjder beräknade enl van der Meer, Ref [4], med simuleringsprogrammet Odiflocs resp enl CUR, Ref [5]. Vindhastighet 25 m/s och dammfrontens lutning 1:2. Med $R_{u\ 2\%}$ avses den uppspolningshöjd som överskrider av 2 % av antalet vågor i en storm.

Effektiv stryklängd (km)	Signifikant våghöjd (m)	Signifikant vågperiod (s)	Uppspolningshöjd ($R_{u\ 2\%}$) (m)		
			v der Meer	Odiflocs	CUR
0,5	0,49	1,72	0,62	-	0,56
1,5	0,85	2,48	1,18	-	1,07
2,5	1,10	2,94	1,59	-	1,44
3	1,20	3,13	1,77	1,76	1,60
4	1,39	3,44	2,09	2,08	1,89
5	1,55	3,70	2,37	2,36	2,15

I simuleringen med Odiflocs förutsattes stenstorleken i dammfrontens erosionsskydd vara nominellt $D_{n50} (= (M_{50}/\rho_{sten})^{1/3}) = 500$ mm. Med den begränsning som är förknippad med programmet Odiflocs förutsattes således att även stödfyllningen hade denna stenstorlek.

Van der Meers beräkningsformel lyder som följer:

$$R_{u\ 2\%} / H_s = 1,5 \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta \gamma_b \epsilon_{op} \quad (3.1)$$

$$R_{u\ 2\%} / H_s \leq 3,0 \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta \quad (3.2)$$

Där $R_{u\ 2\%}$ = den uppspolningshöjd som överskrider av 2 % av antalet vågor (m)

H_s = signifikant våghöjd nära dammtån (m)

γ_h = reduktionsfaktor för grunt vatten vid dammtån

γ_f = reduktionsfaktor för dammfrontens råhet

γ_β = reduktionsfaktor för snett infallande vågriktning

γ_b = reduktionsfaktor för terrasser på dammfronten

ϵ_{op} = vågbrottsparameter = $\tan \alpha / \sqrt{(2 \pi H_s / (g T_p^2))}$

α = dammfrontens lutningsvinkel mot horisontalen (°)

T_p = vågperioden svarande mot maximala vågenergin i spektrumet, ungefär lika med signifikant vågperiod T_s (s)

Med de givna förutsättningarna för de undersökta typdammarna gäller följande värden på parametrarna ovan:

$\gamma_h = 1,0$ (djupt vatten vid dammtån)

$\gamma_f = 0,55$ (erosionsskyddets yta hydrauliskt rå, ≥ 2 lager sten)

$\gamma_\beta = 1,0$ (vågriktning vinkelrätt mot dammen)

$\gamma_b = 1,0$ (inga terrasser på dammfronten)

$\tan \alpha = 0,5$

3.6 Vågöverspolning

3.6.1 Allmänt

Med vågöverspolning avses att vatten från vågor som sköljer upp på dammfronten når över dammkrönet. I föreliggande rapport anses överspolning ske så snart vatten når upp på dammkrönet.

Vågöverspolning har simulerats med programmet Odiflocs i syfte att bestämma motsvarande vattenflöde på krönet uttryckt som överspolad vattenmängd per tidsenhet och längdmeter dammkrön. Flödena har också beräknats med ett samband framtaget av van der Meer, Ref [4].

Flödet av överspolningen är beroende av stenstorleken i dammen. Orsaken härtill är att uppspolningen (se föregående avsnitt) är beroende av stenstorleken i dammfrontens erosionsskydd, och att infiltrationen in i dammkrönet är beroende av stenstorleken i dammkrönet. Genom att Odiflocs endast kan arbeta med ett enda material i dammkroppen utöver tätkärnan måste resultaten värderas. I simuleringen med Odiflocs ansattes tre olika stenstorlekar i (den isotropa) dammkroppen, nämligen med de nominella diametrarna D_{n50} lika med 500 mm, 50 mm resp 10 mm.

Med permeabelt krön på en damm är överspolningens flöde kopplat till vilket läge på dammkrönet som avses. Infiltration in i krönet av vatten från överspolande vågor medför att ett större flöde når krönets uppströmskant än dess nedströmskant. I simuleringarna med programmet Odiflocs undersöktes flödena på uppströmskanten resp på nedströmskanten av dammkrönet.

3.6.2 Medelflöden av vågöverspolning

Medelflödena av vågöverspolning beräknade enl van der Meer resp simulerade med Odiflocs visas i **Tabell 3.5** för en damm med släntrönet på nivån + 3,0 m.

Tabell 3.5 Medelflöden över dammkörnet av vågöverspolning beräknade enl van der Meer, Ref [4], resp med simuleringsprogrammet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och släntrönets nivå + 3,0 m. DG = dämmningsgräns. D_{n50} = nominell stenstorlek i stödfyllningen. Med "Fram" resp "Bak" avses dammkörnets uppströmskant resp nedströmskant. Inramade kolumner bedöms visa rättvisande flöden.

Eff stryk- längd (km)	Sign våg- höjd (m)	Sign våg- period (s)	Vatten- stånd rel DG (m)	Medelflöde av vågöverspolning (l/s/m)						
				van der Meer	Odiflocs					
					D _{n50} =500 mm		D _{n50} =50 mm		D _{n50} =10 mm	
					Fram	Bak	Fram	Bak	Fram	Bak
3	1,20	3,13	+ 0,5	0,01	0	0	0	0	0	0
			+ 1,0	0,1	0	0	0,04	0	0,17	0
			+ 1,5	0,8	0,1	0	1,3	0	3,3	0
			+ 2,0	7,5	5,3	0	16	0	28	0,16
			+ 2,5	69	53	0	85	0,3	118	5,2
4	1,39	3,44	+ 0,5	0,1	0	0	0	0	0	0
			+ 1,0	0,5	0	0	0,1	0	0,4	0
			+ 1,5	2,9	0,3	0	3,3	0	9	0
			+ 2,0	19	12	0	34	0	54	0,5
			+ 2,5	123	93	0	136	1,3	178	16
5	1,55	3,70	+ 0,5	0,3	0,02	0	0,2	0	0,4	0
			+ 1,0	1,3	0,6	0	1,8	0	3,6	0,05
			+ 1,5	6,9	4,3	0	12	0,1	22	0,7
			+ 2,0	36	31	0,1	58	1,1	82	5,8
			+ 2,5	184	129	1,4	154	8,4	221	39

I **Tabell 3.6** visas medelflödena av vågöverspolning beräknade enl van der Meer resp simulerade med Odiflocs för en damm med släntrönet på nivån + 2,0 m.

Tabell 3.6 Medelflöden över dammkörnet av vågöverspolning beräknade enl van der Meer, Ref [4], resp med simuleringsprogrammet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och släntrönets nivå + 2,0 m. DG = dämmningsgräns. D_{n50} = nominell stenstorlek i stödfyllningen. Med "Fram" resp "Bak" avses dammkörnets uppströmskant resp nedströmskant.

Eff stryk- längd (km)	Sign våg- höjd (m)	Sign våg- period (s)	Vatten- stånd rel DG (m)	Medelflöde av vågöverspolning (l/s/m)		
				van der Meer	Odiflocs	
					$D_{n50}=50$ mm	
					Fram	Bak
2,5	1,10	2,94	+ 0,5	0,3	0,1	0
			+ 1,0	4,0	5,1	0
			+ 1,5	46	47	0

De medelflöden av vågöverspolning över rönet som simulerats med programmet Odiflocs för stenstorleken $D_{n50} = 500$ mm bedöms vara rättvisande för dammkörnets

uppströmskant. Däremot bedöms de flöden som anges i Tabell 3.5 för nedströmskanten med stenstorleken $D_{n50} = 500$ mm vara något för små, eftersom infiltrationen ned i krönet torde överskattas med detta grova stenmaterial.

Stenstorlekarna $D_{n50} = 50$ mm resp $D_{n50} = 10$ mm i stödfyllningen motsvarar typiska verkliga förhållanden, jämför Tabell 3.1. Simulering med dessa stenstorlekar i hela dammkroppen (utom tätkärnan) medför dock för hög våguppspolning på dammfronten, eftersom erosionsskyddets råhet samt infiltrationen in i erosionsskyddet på dammfronten blir för små. De flöden av vågöverspolning över krönet som redovisas i Tabell 3.5 och 3.6 för stenstorlekarna $D_{n50} = 50$ mm resp $D_{n50} = 10$ mm är därför något för stora. Simuleringarna med $D_{n50} = 50$ mm bedöms ändå spegla verkliga flöden över dammkrönets nedströmskant.

Det kan konstateras att medelflödet av överspolningen förbi dammkrönets nedströmskant är försumbart förutsatt att överdämningen inte är högre än ca + 1,5 m. Det kan också konstateras att medelflödena av vågöverspolning förbi krönets uppströmskant beräknade enl van der Meer resp genom simulering med Odiflocs är av ungefär samma storleksordning vid stenstorlek $D_{n50} = 50$ mm och $D_{n50} = 10$ mm.

Medelflödet av vågöverspolningen över krönets uppströmskant beräknas enligt van der Meer, Ref [4], med följande samband förutsatt att vågorna bryter på dammkrönet:

$$Q_b = 0,06 \exp(-5,2 R_b) \text{ för } \xi_{op} < 2 \text{ (d v s brytande vågor)} \quad (3.3)$$

$$Q_b = (q / \sqrt{(g H_s^3)}) \sqrt{(s_{op} / \tan \alpha)} \quad (3.4)$$

$$R_b = (R_c / H_s) ((\sqrt{s_{op}}) / \tan \alpha) (1 / (\gamma_h \gamma_f \gamma_\beta \gamma_b)) \quad (3.5)$$

där Q_b = dimensionslöst flöde av överspolning p g a brytande vågor

R_b = dimensionslös krönhöjd vid brytande vågor

ξ_{op} = vågbrottsparametern ($= (\tan \alpha) / \sqrt{s_{op}}$)

q = flöde av överspolning i medeltal ($m^3/s/m$)

H_s = signifikant våghöjd nära dammtån (m)

s_{op} = vågornas branthet ($= 2 \pi H_s / (g T_p^2)$)

α = dammfrontens lutningsvinkel mot horisontalen ($^\circ$)

R_c = krönhöjd relativt lugnvattenytan (m)

γ_h = reduktionsfaktor för grunt vatten vid dammtån

γ_f = reduktionsfaktor för dammfrontens råhet

γ_β = reduktionsfaktor för snett infallande vågriktning

γ_b = reduktionsfaktor för terrasser på dammfronten

T_p = vågperioden svarande mot maximala vågenergin i spektrumet, ungefär lika med T_s (s)

Med de givna förutsättningarna för de undersökta typdammarna gäller följande värden på parametrarna ovan:

- $\gamma_h = 1,0$ (djupt vatten vid dammtån)
- $\gamma_f = 0,55$ (erosionsskyddets yta hydrauliskt rå, ≥ 2 lager sten)
- $\gamma_\beta = 1,0$ (vågriktning vinkelrätt mot dammen)
- $\gamma_b = 1,0$ (inga terrasser på dammfronten)
- $\tan \alpha = 0,5$

3.6.3 Maxflöden av vågöverspolning

Det bör påpekas att även om de medelflöden av vågöverspolning som redovisats ovan i Tabell 3.5 och 3.6 är små bör deras verkan ändå analyseras. De nämnda flödena är

beräknade som medeltal av flödena för alla vågor under ett och samma stormtillfälle. Det momentana flöde som en enda stor våg medför kan vara mellan 100 och mer än 1 000 ggr större än detta medelflöde.

I **Tabell 3.7** jämförs medelflödena enl Tabell 3.5 med de maximala momentana flödena. Dessutom redovisas kvoten mellan dessa flöden.

Tabell 3.7 Jämförelse mellan medelflöden och maxflöden över dammkrönet av vågöverspolning beräknade med simuleringsprogrammet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och släntkrönets nivå + 3,0 m. DG = dämningssgräns. Nominell stenstorlek i stödfyllningen $D_{n50} = 50$ mm. Med "Fram" resp "Bak" avses dammkrönets uppströmskant resp nedströmskant.

Eff stryk- längd (km)	Sign våg- höjd (m)	Sign våg- period (s)	Vatten- stånd rel DG (m)	Flöde av vågöverspolning (l/s/m)					
				Fram			Bak		
				Medel	Max	Kvot	Medel	Max	Kvot
3	1,20	3,13	+ 0,5	0	0	-	0	0	-
			+ 1,0	0,04	122	3050	0	0	-
			+ 1,5	1,3	665	511	0	0	-
			+ 2,0	16	1197	75	0	0	-
			+ 2,5	85	2230	26	0,3	404	1347
4	1,39	3,44	+ 0,5	0	0	-	0	0	-
			+ 1,0	0,1	244	2440	0	0	-
			+ 1,5	3,3	784	238	0	0	-
			+ 2,0	34	1412	42	0	0	-
			+ 2,5	136	2546	19	1,3	553	425
5	1,55	3,70	+ 0,5	0,2	562	2810	0	0	-
			+ 1,0	1,8	1125	625	0	0	-
			+ 1,5	12	2060	172	0,1	371	3710
			+ 2,0	58	3159	56	1,1	1058	962
			+ 2,5	154	4709	31	8,4	1876	223

Vid små medelflöden av vågöverspolning är kvoten mellan maximalt flöde och medelflöde stor. Vid större medelflöden minskar denna kvot.

3.7 Inre vattenflöde

3.7.1 Allmänt

Såvitt känt finns inget analytiskt samband för beräkning av vattenflöden inuti krönet över tåtkärnan på en fyllningsdamm. De flöden som i föreliggande undersökning simulerats med programmet Odiflocs, har därför inte kunnat jämföras med några beräkningsresultat.

Liksom vid simuleringen av flödet av överspolning, jämför avsnitt 3.6 ovan, har de inre flödena undersökts i två lägen, nu vid uppströmskanten resp nedströmskanten av tåtkärnans krön. Även vad gäller det inre vattenflödet finns en koppling till stenstorleken i krönet. Genom att Odiflocs endast kan arbeta med ett enda material i dammkroppen utöver tåtkärnan måste resultaten därför även i detta sammanhang värderas. I simuleringen med Odiflocs ansattes tre olika stenstorlekar i (den isotropa)

dammkroppen, nämligen den nominella diametern D_{n50} lika med 500 mm, 50 mm resp 10 mm.

3.7.2 Inre medelflöden

Medelflödena inuti dammkrönet över tåtkärnan av vågöverspolning simulerade med programmet Odiflocs visas i **Tabell 3.8** för en damm med släntkrönet på nivån + 3,0 m. Där anges för jämförelsens skull också flödet av bräddning över krönet utan inverkan av vågor när vattenståndet i reservoaren är högre än tåtkärnans krön.

Tabell 3.8 Medelflöden inuti dammkrönet p g a vågöverspolning och bräddning över tåtkärnan simulerade med programmet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och släntkrönets nivå + 3,0 m. DG = dämningssgräns. D_{n50} = nominell stenstorlek i stödfyllningen. Med "Fram" resp "Bak" avses uppströmskanten resp nedströmskanten av tåtkärnans krön. "Utan våg" avser flödet utan vågor i reservoaren. Inramade kolumner bedöms visa rättvisande flöden.

Eff stryk- längd (km)	Sign våg- höjd (m)	Sign våg- period (s)	Vatten- stånd rel DG (m)	Medelflöde inuti dammkrönet (l/s/m)								
				$D_{n50}=500$ mm			$D_{n50}=50$ mm			$D_{n50}=10$ mm		
				Fram	Bak	Utan våg	Fram	Bak	Utan våg	Fram	Bak	Utan våg
3	1,20	3,13	+ 0,5	3,3	0,4	0	0	0	0	0	0	0
			+ 1,0	29	14	0	1,3	0,2	0	-	-	0
			+ 1,5	62	54	86	16	14	83	4,4	4	74
			+ 2,0	137	131	200	42	43	198	12	13	168
			+ 2,5	220	219	342	74	84	327	21	29	237
4	1,39	3,44	+ 0,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0
			+ 1,0	19	18	0	1,4	0,3	0	-	-	0
			+ 1,5	68	55	86	16	15	83	4,6	4,6	74
			+ 2,0	146	136	200	42	45	198	12	16	168
			+ 2,5	231	230	342	71	91	327	21	33	237
5	1,55	3,70	+ 0,5	7,3	3	0	0,03	0,01	0	0,01	0	0
			+ 1,0	36	20	0	3,8	0,9	0	0,3	0,1	0
			+ 1,5	77	57	86	17	16	83	4,8	5,6	74
			+ 2,0	152	140	200	41	48	198	13	18	168
			+ 2,5	230	234	342	57	79	327	21	35	237

I **Tabell 3.9** visas medelflödena inuti dammkrönet av vågöverspolning simulerade med Odiflocs för en damm med släntkrönet på nivån + 2,0 m.

Tabell 3.9 Medelflöden inuti dammkrönet p g a vågöverspolning och bräddning över tåtkärnan simulerade med programmet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och slänkrönet nivå + 2,0 m. DG = dämningssgräns. D_{n50} = nominell stenstorlek i stödfyllningen. Med "Fram" resp "Bak" avses uppströmskanten resp nedströmskanten av tåtkärnans krön

Eff stryk- längd	Sign våg- höjd	Sign våg- period	Vatten- stånd rel DG	Medelflöde dammkrönet inuti	
				Odiflocs	
				D _{n50} =50 mm	
				Fram	Bak
(km)	(m)	(s)	(m)		
2,5	1,10	2,94	+ 0,5	0	0
			+ 1,0	14	13
			+ 1.5	37	40

Simuleringen med stenstorleken $D_{n50} = 500$ mm i hela dammkroppen (utom tåtkärnan) medför rättvisande våguppspolning men ger för hög permeabilitet i krönet och därmed för stor infiltration in i krönet. Simulering med stenstorleken $D_{n50} = 50$ mm eller 10 mm medför att permeabiliteten i krönet motsvarar verkliga förhållanden, jämför Tabell 3.1, men ger för hög våguppspolning på dammfronten och därigenom för stort vattenflöde upp på krönet, som sedan kan infiltrera.

För det inre flödet bedöms ändå permeabiliteten hos stödfyllningen ha störst betydelse. Av resultaten från simuleringarna avseende flödet över dammkrönet av vågöverspolning, avsnitt 3.6 och Tabell 3.5, kan konstateras att med stenstorleken $D_{n50} = 50$ mm är flödet över krönets uppströmskant endast måttligt större än vad som fås med stenstorleken $D_{n50} = 500$ mm. Därför görs här värderingen att de inre medelflödena i dammkrönet bestämda genom simulering med programmet Odiflocs med stödfyllning av sten med storleken $D_{n50} = 50$ mm är något överskattade men av rätt storleksordning.

En jämförelse av de inre medelflödena i dammkrönet förutsatt vågor resp inga vågor visar att simuleringarna ger mindre medelflöden med vågor än utan vågor. Detta förhållande gäller inte nödvändigtvis momentana inre flöden.

Följande kommentarer ges till resultaten för medelflödena inuti krönet för den högre dammen med $D_{n50} = 50$ mm, jämför Tabell 3.8 och 3.9:

- Vid vindhastigheten 25 m/s och vattenståndet + 0,5 m relativt dämningssgränsen är det inre medelflödet försumbart oavsett beaktad stryklängd.
- Ökad stryklängd och därmed större vågor medför inte någon markant förändring av det inre medelflödet.
- Vid de större inre medelflödena är respektive flöde vid uppströmskanten resp nedströmskanten av tåtkärnans krön ungefär lika. Bara vid små inre medelflöden, vid vattenstånd upp till ca + 1,0 m relativt dämningssgränsen, är medelflödet vid tåtkärnans uppströmskant klart större än flödet vid nedströmskanten. Det senare förklaras med cirkulerande flöden på uppströmssidan av tåtkärnans krön.

3.7.3 Inre maxflöden

De medelflöden som redovisats ovan i Tabell 3.8 och 3.9 är medeltal av de inre momentana flödena p g a alla vågor under ett och samma stormtillfälle. De momentana inre flödena är större än detta medelflöde. I **Tabell 3.10** jämförs medelflöden enl Tabell 3.8 med de maximala momentana flödena. Dessutom redovisas kvoten mellan dessaflöden.

Tabell 3.10 Jämförelse mellan medelflöden och maxflöden inuti dammkrönet p g a vågöverspolning och bräddning över tatkärnan beräknade med simuleringsprogrammet Odiflocs. Vindhastighet 25 m/s, dammfrontens lutning 1:2 och släntkrönets nivå + 3,0 m. DG = dämmningsgräns. Nominell stenstorlek i stödfyllningen $D_{n50} = 50$ mm. Med "Fram" resp "Bak" avses uppströmskanten resp nedströmskanten av tatkärnans krön

Eff stryk- längd (km)	Sign våg- höjd (m)	Sign våg- period (s)	Vatten- stånd rel DG (m)	Flöde inuti dammkrönet (l/s/m)					
				Fram			Bak		
				Medel	Max	Kvot	Medel	Max	Kvot
3	1,20	3,13	+ 0,5	0	0	-	0	0	-
			+ 1,0	1,3	46	35	0,2	10	50
			+ 1,5	16	78	4,9	14	39	2,8
			+ 2,0	42	142	3,4	43	101	2,3
			+ 2,5	74	190	2,6	84	177	2,1
4	1,39	3,44	+ 0,5	0	0	-	0	0	-
			+ 1,0	1,4	57	41	0,3	18	60
			+ 1,5	16	75	4,7	15	44	2,9
			+ 2,0	42	150	3,6	45	127	2,8
			+ 2,5	71	210	3,0	91	179	2,0
5	1,55	3,70	+ 0,5	0,03	26	867	0,01	0,9	90
			+ 1,0	3,8	86	23	0,9	64	71
			+ 1,5	17	92	5,4	16	107	6,7
			+ 2,0	41	139	3,4	48	150	3,1
			+ 2,5	57	182	3,2	79	191	2,4

Det kan konstateras att kvoten mellan maximalt flöde och medelflöde är mindre för det inre flödet i dammkrönet än för flödet över krönet av vågöverspolning (se avsnitt 3.6, Tabell 3.7). Uppenbarligen sker inuti dammkrönet en utjämning av flödet. Det inre flödet i dammkrönet orsakas huvudsakligen av flera på varandra följande överspolande vågor i en vågrupp, vilka medför att en inre grundvattenyta byggs upp under en längre tid. På tatkärnans baksida kan inverkan av enstaka vågor knappt märkas.

3.7.4 Jämförande beräkning med programmet Skylla

En jämförelse av flödena beräknade med det enklare programmet Odiflocs resp det mer avancerade programmet Skylla har gjorts. Därvid förutsattes monokroma vågor eftersom programmet Skylla endast kan arbeta med sådana vågor, jämför avsnitt 3.2.2. Jämförelsen visade att det enklare programmet Odiflocs beräknar de inre flödena med tillfredsställande noggrannhet.

3.8 Erforderlig stenstorlek på dammens krön

3.8.1 Allmänt

Motståndsförmågan hos dammkrön mot erosion av överspolande vågor har såvitt känt inte tidigare undersökts. Orsaken till detta torde vara att man vanligen inte tillåter att fyllningsdammar överspolas. Undersökningar om liknande fall av erosion finns beskrivna för provisoriska fångdammar av sten, för vågbrytare och för havsstränder. Vad gäller vågbrytare och stränder av sten har avsevärda resurser lagts ned på forskning avseende den slutliga formen efter ras eller deformation p g a vågverkan. Generellt gäller att det är komplicerat att förutsäga om några få stenar på ett dammkrön kommer att flyttas p g a vågverkan. I jämförelse är det enklare att förutsäga den slutliga geometriska formen för en vågbrytare av sten som utsätts för stora vågor under längre tid. En damm kan däremot knappast tillåtas ändra form.

Med programmet Odiflocs kan man beräkna den slutliga formen hos t ex en vågbrytare, men det är inte möjligt att bestämma gränsen för begynnande erosion för enstaka stenar på krönet.

I denna utredning har därför gjorts en jämförelse med tillfällig avstängning av vattendrag medelst fångdammar av sten.

3.8.2 Dammkrönets framkant

Med den utformning av erosionsskyddet på dammfronten som förutsatts gälla i denna utredning, se Figur 3.1 och 3.2, är avslutningen uppe vid dammkrönet ett känsligt område. I föreliggande undersökning är erosionsskyddets tjocklek sådan att endast ett stenblock ryms. Dessutom är de finare stenmaterialen i filtret under erosionsskyddet och i krönet blottade i det område som kan utsättas för uppspolning och överspolning p g a vågor. Motståndsförmågan mot erosion skulle öka om erosionsskyddet förlängdes bakåt upp på krönet.

3.8.3 Dammkrönets bakkant

För dimensionering av krönet mot begynnande erosion är det maximala flödet (och således inte medelflödet) vid dammkrönets nedströmskant av vågöverspolning dimensionerande. I föreliggande undersökning har utgått ifrån de maximala flöden över dammkrönet av överspolning som bestämts genom simulering med programmet Odiflocs, jämför Tabell 3.7.

I den tidigare undersökningen, Ref [1], har angivits en ekvation enl CUR, Ref [5], för bestämning av erforderlig stenstorlek på dammkrönet. Det kan konstateras att denna ekvation kan ge ett överslagsvärde på erforderlig stenstorlek på dammkrönet förutsatt att dammkrönets höjd är klart mindre än vågornas teoretiska uppspolningshöjd. I föreliggande undersökning kan förutsättas att endast mindre överspolning p g a vågor kan tillåtas, eftersom stenmaterialet på krönet är relativt klen. I sådana fall medför nämnda ekvation att beräknad erforderlig stenstorlek kommer att vara nära noll och ekvationen används då utanför sitt giltighetsområde. Formeln är i stället avsedd för vågbrytare som utsätts för kraftig överspolning.

I samband med byggandet av barriärer i Nederländerna, det s k Deltaprojektet, gjordes undersökningar av erforderlig stenstorlek på krönet av fångdammar. Från den undersökningen, **Ref [6]**, har följande samband härletts:

$$q_c = 0,30 g^{0,5} (\Delta D_n)^{1,5} \quad (3.6)$$

- där q_c = kritiskt momentant flöde över dammkrönets nedströmskant av vågöverspolning med avseende på begynnande erosion ($m^3/s/m$)
 g = tyngdaccelerationen (m/s^2)
 Δ = relativ densitet hos stenmaterialet = $(\Delta_{sten} - \Delta_{vatten})/\Delta_{vatten}$
 D_n = nominell stenstorlek = $(M_{sten}/\rho_{sten})^{1/3}$ (m)

Med den storlek på stenmaterialet i krönet som förutsatts i denna utredning, jämför Tabell 3.1, är de momentana flöden som kan tillåtas av vågöverspolning enl **Tabell 3.11**.

Tabell 3.11 Kritiskt momentant flöde på dammkrönets nedströmskant av vågöverspolning enl Ekv (3.6) med avseende på begynnande erosion. Stenens densitet är $2,65 t/m^3$.

Stenstorlek (mm)	Tillåtet momentant flöde (l/s/m)
10	2,0
50	22
100	63

Som nämnts avser Ekv (3.6) överspolning av krönets nedströmskant. Av Tabell 3.7 framgår att krönets nedströmskant överspolas endast i ett fåtal av de beaktade fallen, t ex om dammagasinets nivå är + 1,5 m eller högre och den effektiva stryklängden är minst 5 km. De momentana maximala flödena över krönets nedströmskant är då genast avsevärt större än de tillåtna enligt Tabell 3.11.

Krönets stabilitet kan dock ifrågasättas även om vattennivån i dammagasinet inte överskrider + 1,0 m. I detta fall förekommer ingen överspolning av dammkrönets nedströmskant, men de maximala momentana flödena över dammkrönets uppströmskant

är ändå avsevärda, t ex ca 1 100 l/s/m vid 5 km stryklängd och dammagasinets nivå + 1,0 m, jämför Tabell 3.7. Stabiliteten hos krönet blir i detta fall beroende av att överspolande vatten strömmar ned i dammkrönet i stället för att rinna över dammkrönet. Om det är tveksamt att permeabiliteten i krönet kan garanteras under dammens livslängd bör överdämning upp till nivån + 1,0 m inte tillåtas.

3.9 Erforderlig stenstorlek på dammens nedströmsslänt

Med resultat från tidigare undersökningar rörande stabiliteten hos branta utskov, **Ref [7]**, har följande samband härletts för flöden nedför en slänt med lutning 1:2:

$$q_c = 0,28 g^{0,5} (\Delta D_n)^{1,5} \quad (3.7)$$

där q_c = kritiskt momentant flöde på dammens nedströmsslänt med avseende på begynnande erosion ($m^3/s/m$)

g = tyngdaccelerationen (m/s^2)

Δ = relativ densitet hos stenmaterialet=
($\Delta_{sten} - \Delta_{vatten}$)/ Δ_{vatten}

Med den storlek på stenmaterialet i krönet som förutsatts i denna utredning, jämför Tabell 3.1, är de momentana flöden som kan tillåtas på nedströmsslänten av en fyllningsdamm enl **Tabell 3.12**.

Tabell 3.12 Kritiskt momentant flöde på dammars nedströmsslänt enl Ekv (3.7) med avseende på begynnande erosion. Stenens densitet är 2,65 t/m³. Släntlutning 1:2.

Stenstorlek (mm)	Tillåtet momentant flöde (l/s/m)
10	1,9
50	21
100	59

De tillåtna flödena på nedströmsslänten motsvarar således ungefär de som gäller för krönet, jämför Tabell 3.11.

Det maximala flödet kan förväntas uppträda nära dammens nedströmstå. Detta flöde har inte kunnat simuleras med program Odiflocs eftersom tredimensionella effekter har avgörande inverkan. Det föreslås i stället att de maximala momentana inre flödena i krönet förbi tätkärnans nedströmsskant enligt Tabell 3.10 används som representativa för flödet på dammens nedströmsslänt.

4 Dimensioneringsunderlag

4.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs slutsatser som kan dragas från de resultat som erhållits i undersökningen enligt kapitel 3 ovan. Även diskuteras ett tänkbart underlag för dimensionering av erforderlig stenstorlek på fyllningsdammars krön och nedströmsslänter.

4.2 Vågor

För beräkning av vågors storlek har i denna undersökning använts en metod enligt Ref [2], vilken inte tidigare har värderats av VASO dammkommitté. I avsnitt 3.4 har konstaterats att med den metod för vågberäkning enligt Saville som rekommenderas av VASO dammkommitté, Ref [3], fås något mindre våghöjder men å andra sidan något större vågperioder än med den metod enligt Ref [2] som använts i föreliggande undersökning. De resp skillnader i resultat som fås för våghöjd och vågperiod bedöms dock för aktuella förhållanden i stort sett kompensera varandra vid beräkning av tex våguppspolning och vågöverspolning.

Här görs bedömningen att beräkning enligt Ref [2] inte medför väsentliga skillnader i resultat jämfört med beräkning enligt Ref [3]. Det föreslås därför att rekommendationen i Ref [3] att använda Savilles metod för beräkning av vågor på dammreservoarer skall kvarstå.

Sammanfattning: Vågberäkning görs med Savilles metod enligt Ref [3].

4.3 Våguppspolning

I avsnitt 3.5 har konstaterats att uppspolningshöjden på en dammfront kan beräknas med acceptabel noggrannhet med en metod utvecklad av van der Meer enligt Ref [4]. Med denna metod kan den uppspolningshöjd $R_{u 2 \%}$ beräknas som överskrider av 2 % av antalet vågor, dvs av 1 av 50 vågor vid ett och samma stormtillfälle.

I Ref [6] anges att praxis i Sverige vid dimensionering av dammars krön m h t våguppspolning är att beräkna den uppspolningshöjd $R_{u 0,05 \%}$ som överskrider av 1 av 2000 vågor, dvs av 0,05 % av antalet vågor.

Eftersom 1 av 50 vågor i en vågserie är högre än $1,40 H_s$ och 1 av 2000 vågor i en vågserie är högre än $1,95 H_s$ görs här antagandet att förhållandet mellan de nämnda våguppspolningarna är $R_{u 2 \%}/R_{u 0,05 \%} = 1,95/1,40 = 1,4$.

Med detta antagande skulle således följande samband kunna användas för beräkning av våguppspolningens höjd med den undersökta dammgeometrin, jfr ekv (3.1) och (3.2):

$$R_{u\ 0,05\ \%} / H_s = 2,1 \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta \gamma_b \epsilon_{op} = 2,1 \gamma_f >_{op} \quad (4.1)$$

$$R_{u\ 0,05\ \%} / H_s \leq 4,2 \gamma_f \quad (4.2)$$

där $R_{u\ 0,05\ \%}$ = den uppspolningshöjd som överskrider av 0,05 %
av antalet vågor (m)

Betydelsen av de övriga parametrarna framgår av avsnitt 3.5.

Sammanfattning: För beräkning av uppspolningshöjden $R_{u\ 0,05\ \%}$ på dammfronten kan användas Ekv (4.1) och (4.2).

4.4 Vågöverspolning

Som nämnts i avsnitt 3.6 är flödet av vågöverspolning över dammkrönet beroende av permeabiliteten och råheten hos erosionsskyddet på dammfronten och av permeabiliteten hos stödfyllningen. Flödet avtar från dammkrönets uppströmskant till dess nedströmskant.

Undersökningen visar att medelflödet av vågöverspolning över dammkrönets uppströmskant kan beräknas till rätt storleksordning med det samband som utvecklats av van der Meer enligt Ref [3]. Detta samband föreslås användas vid dimensionering i den föregående undersökningen, Ref [1].

Därför föreslås att sambanden upprättade av van der Meer enl Ekv (3.3), (3.4) och (3.5) används för beräkning av medelflödet över dammkrönets uppströmskant av vågöverspolning:

$$Q_b = 0,06 \exp(-5,2 R_b) \text{ för } \xi < 2 \text{ (d v s brytande vågor)} \quad (3.3)$$

$$Q_b = (q / \sqrt{(g H_s^3)}) \sqrt{(s_{op} / \tan \alpha)} \quad (3.4)$$

$$R_b = (R_c / H_s) ((\sqrt{s_{op}}) / \tan \alpha) (1 / (\gamma_h \gamma_f \gamma_\beta \gamma_b)) \quad (3.5)$$

Betydelsen av parametrarna framgår av avsnitt 3.6.2.

Simuleringarna har visat att medelflödet över dammkrönets nedströmskant är försumbart, förutsatt att överdämningen inte är högre än ca +1,5 m med de undersökta ströklängderna.

Ingen beräkningsformel finns tillgänglig för beräkning av det maximala momentana flödet över dammkrönet av vågöverspolning. Bestämningen av dessa flöden måste i stället göras med en datorbaserad simuleringsmodell. Simuleringarna med programmet Odiflocs visar att det maximala momentana flödet förbi dammkrönets uppströmskant kan vara mer än ca 1 000 ggr större än flödet i medeltal för överdämningar upp till ca + 1,0 m. För de största överdämningar som undersökts, upp till + 2,5 m, är förhållandet av storleksordningen ca 30.

Sammanfattning: För beräkning av medelflödet över dammkrönets uppströmskant av vågöverspolning kan användas Ekv (3.3), (3.4) och (3.5). Medelflödet över dammkrönets nedströmskant är försumbart (i de undersökta fallen). Detta flöde kan bestämmas endast genom simulering. De maximala momentana flödena över dammkrönet av vågöverspolning måste också bestämmas genom simulering. Dessa flöden kan vara ca 30 till mer än 1 000 ggr större än medelflödena.

4.5 Inre vattenflöde

Såvitt känt finns inte något analytiskt samband för beräkning av vattenflödet inuti krönet över tät kärnan.

De medelflöden som redovisats i avsnitt 3.7.2, Tabell 3.8, som resultat av simuleringarna med programmet Odiflocs är inte alldeles enkla att tolka. Särskilt komplicerad blir utvärderingen om överdämningen medför att lugnvattenytan i dammreservoaren ligger högre än tät kärnans krön. I det fallet är det inre flödet en kombination av verkan av både vågor och bräddning.

Vid överdämning upp till nivån + 1,0 m med den undersökta högre dammen (med krönet på nivån + 3,0 m) sker ingen bräddning över tät kärnan. Det inre vattenflödet är då enbart orsakat av vågornas verkan. Denna omständighet låter sig enklare analyseras. I den föregående undersökningen, Ref [1], föreslogs att medelflödet av vatten till dammens nedströmsslant skulle beräknas som medelflödet över dammkrönets uppströmskant av överspolande vågor beräknat med Ekv (3.3), (3.4) och (3.5).

En jämförelse kan göras av medelflödet över dammkrönets uppströmskant av vågöverspolning beräknat enligt van der Meer med Ekv (3.3), (3.4) och (3.5) (se Tabell 3.5) och medelflödet inuti dammkrönet förbi nedströmsskanten av tät kärnans krön beräknat genom simulering med programmet Odiflocs för stenstorleken $D_{n50} = 50$ mm (Tabell 3.8). En sådan jämförelse visar att van der Meers samband ger resultat av någorlunda rätt storleksordning, dock bara under förutsättning av nämnda värden på magasinets vattennivå (upp till tät kärnans krön, +1,0 m) och stenstorlek i dammen ($D_{n50} = 50$ mm).

Sammanfattning: Undersökningarna visar att inre medelvattenflöden inuti dammkrönet förbi nedströmsskanten av tät kärnans krön p g a vågornas verkan kan uppskattas någorlunda rättvisande med Ekv (3.3), (3.4) och (3.5) vid de angivna förutsättningarna (överdämningsnivån lägre än tät kärnans krönnivå; $D_{n50} = 50$ mm). Generella beräkningsformler för noggrann bestämning av det inre flödet i medeltal och momentant p g a vågor saknas dock. Sådan bestämning måste i stället göras med en datorbaserad numerisk simuleringsmodell.

4.6 Stenstorlek på dammkrönet

För dimensionering av sten på dammkrönet har föreslagits att sambandet enligt Ekv (3.6) används:

$$q_c = 0,30 g^{0,5} (\Delta D_n)^{1,5} \quad (3.6)$$

där q_c = kritiskt momentant flöde över dammkrönets nedströmskant av vågöverspolning med avseende på begynnande erosion ($m^3/s/m$)
 g = tyngdaccelerationen (m/s^2)
 Δ = relativ densitet hos stenmaterialet = $(\Delta_{sten} - \Delta_{vatten})/\Delta_{vatten}$
 D_n = nominell stenstorlek = $(M_{sten}/\rho_{sten})^{1/3}$ (m)

I Tabell 3.11 har angivits tillåtna värden beräknade med Ekv (3.6) på det momentana flödet (q_c) på dammkrönets nedströmskant p g a vågöverspolning.

Användningen av sambandet enligt Ekv (3.6) för beräkning av erforderlig stenstorlek på dammkrönets nedströmskant kompliceras av, att det maximala momentana flödet av vågöverspolning över dammkrönets nedströmskant (q_c) ingår som en parameter. Ingen beräkningsformel finns nämligen tillgänglig för beräkning av detta flöde. Man är i stället hänvisad till att använda resultat från datorbaserade simuleringar för att få värden på nämnda flöde.

Om överdämning tillåts till högst nivå + 1,0 m fås i inget av de undersökta fallen (släntkrönets nivå + 3,0 m, nominell stenstorlek i stödfyllningen $D_{n50}=50$ mm) överspolning fram till dammkrönets nedströmskant, jämför Tabell 3.7. Detta skulle kunna tolkas som att överdämning upp till nivå + 1,0 m skulle kunna tillåtas för dessa fall. Dock kan det maximala momentana flödet över dammkrönets uppströmskant bli avsevärt vid nämnda uppdämning, jämför Tabell 3.7. Skulle dammkrönets permeabilitet vara för liten leds då flödet från krönets uppströmskant vidare till dess nedströmskant. Skada skulle då kunna uppstå på krönets nedströmskant.

Resonemanget ovan skulle motivera att överdämningen begränsas till ca + 0,5 m för den undersökta dammen med krönets nivå + 3,0 m om krönets permeabilitet är liten. För den undersökta dammen med krönets nivå + 2,0 m skulle i princip överdämning inte vara tillåten.

Sammanfattning: Erforderlig stenstorlek på dammkrönet m h t begynnande erosion bestäms med utgångspunkt från de maximala momentana flödena över dammkrönets nedströmskant av vågöverspolning. Dessa flöden måste bestämmas genom simulering, jämför avsnitt 4.4. Tillåtna värden på dessa flöden visas i Tabell 3.11. Om infiltration ned i dammkrönet av överspolande vatten är säkerställd skulle överdämning till nivå + 1,0 m resp + 0,5 m kunna tillåtas för de undersökta nivåerna + 3,0 m resp + 2,0 m på dammkrönet oavsett stenstorlek på krönet och stryklängd. Är sådan infiltration inte

säkerställd kan överdämning tillåtas till ca + 0,5 m för den undersökta dammen med krönnivå + 3,0 m. För den undersökta dammen med krönets nivå + 2,0 m skulle då överdämning inte vara tillåten.

4.7 Stenstorlek på dammens nedströmsslänt

För dimensionering av sten på dammens nedströmsslänt har föreslagits att sambandet enligt Ekv (3.7) används för släntlutning 1:2:

$$q_c = 0,28 g^{0,5} (\Delta D_n)^{1,5} \quad (3.7)$$

där q_c = kritiskt momentant flöde på dammens nedströmsslänt med avseende på begynnande erosion ($m^3/s/m$)
 g = tyngdaccelerationen (m/s^2)
 Δ = relativ specifik tyngd hos stenmaterialet = $(\Delta_{sten} - \Delta_{vatten})/\Delta_{vatten}$
 D_n = nominell stenstorlek = $(M_{sten}/\rho_{sten})^{1/3}$ (m)

I Tabell 3.12 har angivits tillåtna värden beräknade med Ekv (3.7) på det momentana flödet (q_c) på dammens nedströmsslänt.

Det momentana flödet (q_c) på dammens nedströmsslänt har inte kunnat simuleras med programmet Odiflocs. Det föreslås i stället att det momentana flödet (q_c) på dammens nedströmsslänt sätts lika med det maximala momentana inre flödet i krönet förbi tåtkärnans nedströmskant enligt Tabell 3.10.

I detta sammanhang måste beaktas inverkan av topografin i området för dammen, eftersom den utströmmande mängden vatten beror på hur vattnet leds mot lågpunkter i terrängen. Det bör vara rimligt att antaga att flödet på dammens nedströmsslänt kan koncentreras, vilket skulle medföra att de maximala momentana flöden som anges i Tabell 3.10 förstärktes. Om man antager att flödet på en 100 m lång sträcka av dammkrönet läcker ut längs en 10 m sträcka längs släntfoten fås en 10-faldig förstärkning av flödena i Tabell 3.10.

Med stödfyllningen utförd med stenstorlek $D_{n50} = 50$ mm har beräknats att tillåtet momentant flöde på nedströmsslänten skulle vara 21 l/s/m för de undersökta dammarna, jämför Tabell 3.12. Förutsatt 10-faldig förstärkning av flödena i Tabell 3.10 skulle man således kunna tillåta överdämning högst till nivån + 0,5 m med de använda förutsättningarna. Även utan förstärkning av flödet p g a terrängens topografi skulle denna begränsning gälla vid stryklängd av 5 km. För stryklängder upp till 4 km skulle man utan förstärkning av flödet kunna tillåta överdämning till nivå + 1,0 m.

Sammanfattning: Erforderlig stenstorlek på dammslänter m h t begynnande erosion bestäms med utgångspunkt från de maximala momentana flödena på dammens nedströmsslänt av vågverkan. Dessa flöden har inte kunnat bestämmas direkt eller simuleras i föreliggande undersökning, jämför avsnitt 4.5. Förslagsvis approximeras detta flöde med det maximala flödet i dammkrönet förbi tåtkärnans nedströmskant enligt

Tabell 3.10 (släntkrönets nivå +3,0 m, nominell stenstorlek i stödfyllningen $D_{n50}=50$ mm). Tillåtna värden på detta flöde visas i Tabell 3.12. Förutsatt 10-faldig förstärkning p g a inverkan av topografin på det inre flödet kan överdämning till + 0,5 m tillåtas för den undersökta dammen med krönnivå +3,0 m. För den undersökta dammen med krönnivå +2,0 m skulle då överdämning inte vara tillåten.

5 Jämförelse av resultaten från undersökningarna med befintliga anvisningar

5.1 Våguppspolning

Som nämnts i avsnitt 4.3 har det i Sverige varit brukligt att dimensionera fyllningsdammar med hänsyn till den uppspolning som överskrids av 1 av 2000 vågor, dvs av 0,05 % av antalet vågor, under en dimensionerande storm, jämför Ref [6]. Ett beräkningssamband har tagits fram i denna undersökning enl Ekv (4.1) och (4.2).

Följande samband har hämtats från befintliga anvisningar, Ref [6], och avser uppspolning på en dammfront med erosionsskydd av oordnad fyllning av tippad sten när vågornas rörelseriktning är vinkelrät mot dammfronten:

$$R_{u\ 0,05\ \%} = 2,0 H_s \quad (5.1)$$

En jämförelse mellan våguppspolningen beräknad med Ekv (4.1) och Ekv (5.1) visas i **Tabell 5.1**.

Tabell 5.1 Uppspolningshöjder på dammfronter beräknade med Ekv (4.1) resp (5.1). Vindhastighet 25 m/s och dammfrontens lutning 1:2. Med $R_{u\ 0,05\ \%}$ avses den uppspolningshöjd som överskrids av 0,05 % av antalet vågor i en storm.

Effektiv stryklängd (km)	Signifikant våghöjd (m)	Signifikant vågperiod (s)	Uppspolningshöjd ($R_{u\ 0,05\ \%}$) (m)	
			Ekv (4.1)	Ekv (5.1)
0,5	0,49	1,72	0,87	0,98
1,5	0,85	2,48	1,65	1,70
2,5	1,10	2,94	2,23	2,20
3	1,20	3,13	2,48	2,40
4	1,39	3,44	2,93	2,78
5	1,55	3,70	3,32	3,10

Resultaten med beräkning enl Ekv (4.1) och (5.1) är ungefärligen lika. Med Ekv (4.1) tas hänsyn till vågperioden, vilket medför att resultaten jämförelsevis borde vara mer rättvisande. Å andra sidan har Ekv (4.1) baserats på en förutsättning om uppspolningshöjd som funktion av dimensionerande vågens höjd som inte verifierats (jämför avsnitt 4.3).

Slutsatsen måste bli att nuvarande praxis för beräkning av vågors uppspolningshöjd enl Ref [6] inte bör ändras.

5.2 Vågöverspolning och inre vattenflöde

Inga anvisningar finns för beräkning av flödet av vågöverspolning eller av det inre vattenflödet i krönet över tatkärnan (jämför avsnitt 4.4 resp 4.5).

5.3 Stenstorlek på dammkrönet

Inga anvisningar finns för hydraulisk dimensionering av dammkrönets fyllning. I **Ref [9]** finns råd angående dammkrönets utformning m h t krigsskydd respektive tjälnedträngning till tätkärnan.

5.4 Stenstorlek på dammens nedströmsslänt

I Ref [9] ges anvisningar för hur dammens nedströmsslänt bör vara beskaffad. Dock saknas anvisningar för hydraulisk dimensionering av nedströmsslänten.

I Ref [1] och i **Ref [10]** anges en uppskattning av erforderlig stenstorlek vid nedströms dammtå som funktion av vattenflödet i slänten. Den angivna stenstorleken är av samma storleksordning som visas i Tabell 3.12 i föreliggande rapport.

6 Diskussion och slutsatser

Som nämnts i avsnitt 1.2 har syftet med föreliggande utredning varit att upprätta ett underlag för noggrann bestämning av erforderligt fribord för fyllningsdammar. Noggrannheten i bestämningen blir bl a beroende av dels noggrannheten med vilken indata kan anges, dels noggrannheten i metoderna för beräkning av våguppspolning och genomströmning i dammkrönet p g a vågöverspolning.

För denna utredning har materialegenskaperna hos dammen förutsatts vara kända, medan metoder för beräkning av våguppspolning och genomströmning p g a vågöverspolning har undersökts och diskuterats.

För bestämning av erforderligt fribord måste också beaktas två tänkbara principer för dimensionering av dammars fribord, nämligen:

- Princip 1: Fribordet väljs så att överspolning av krönet eller att genomströmning ej uppstår.
- Princip 2: Fribordet väljs så att genomströmning kan uppstå, men så att den blir kontrollerad och anpassad efter egenskaperna hos dammens fyllningsmaterial.

Dessa båda principer för dimensionering ställer olika krav på kunskap enligt följande sammanställning:

- | | |
|----------------|--|
| För princip 1: | Kunskap krävs om fyllnadsmaterialet i uppströmsslänten, vågförhållanden samt uppspolningshöjd och genomströmning p g a vågor. |
| För princip 2: | Samma kunskap krävs som för princip 1, men dessutom kunskap om hur resistent dammkrönet, nedströmsslänten, tätkärnan och dammtån är mot erosion p g a överspolning och genomströmmande vatten. |

Att utforma dammen efter princip 2 så att det genom dammen strömmande vattnet p g a vågverkan blir begränsat till storlek efter vad dammen tål kräver avancerade kunskaper om överspolning och om strömningen inuti dammen över tätkärnan p g a vågor.

Ett försök till bedömning av nuvarande kunskapsnivå för beräkning av dessa storheter ges nedan:

- a) Vågförhållanden: Många undersökningar har gjorts för att ta fram metoder för beräkning av vågors storlek. Ändå finns osäkerheter i beräknade värden. Osäkerheten i bestämningen bedöms kunna vara ca 10 - 20 %.
- b) Uppspolningshöjd: Även finns många undersökningar gjorda för att ta fram metoder för beräkning av uppspolningshöjd. Också här finns osäkerheter i beräknade värden. Osäkerheten i bestämningen bedöms kunna vara ca 10 - 15 % vid förutsatta värden på vågstorlek.

- c) Vågöverspolning: Antalet undersökningar av metoder för beräkning av flöden över dammkrönet p g a överspolande vågor bedöms i jämförelse med ovanstående undersökningar vara litet. Den metod som föreslagits av van der Meer för beräkning av medelflöden har här bedömts ge rättvisande värden, eftersom överensstämmelsen med värden från datorbaserade numeriska simuleringar är god (jfr avsn 3.6 och 4.4). Bestämning av maximala momentana flöden är såvitt känt endast möjligt att utföra genom numeriska simuleringar. Det är inte möjligt att uttala sig om vilken noggrannhet som uppnås med dessa metoder. Osäkerheten kan vara av storleksordningen 100 % eller större.
- d) Inre vattenflöde/genomläckning: Såvitt känt har inga tidigare undersökningar gjorts av flödet inuti krönet över dammkärnan på en fyllningsdamm. Man skulle därför vara hänvisad till att bestämma sådana flöden med hjälp av numerisk simulering på sätt som gjorts i föreliggande undersökning. Inte heller för beräkning av denna storhet är det möjligt att uttala sig om vilken noggrannhet som kan uppnås med simulering. Osäkerheten kan vara av storleksordningen 100 % eller större.
- e) Stenstorlek på dammens krön och nedströmsslänt: Kunskapsnivån för sådana beräkningar förefaller relativt låg. De samband som föreslagits i föreliggande rapport bygger på undersökningar avseende kraftig överspolning av fångdammar. Osäkerheten i den föreslagna bestämningen är svår att bedöma.
- f) Erosionsrisk hos tät kärnan: Denna risk är en funktion av den genomströmmande vattenmängden. Denna risk har inte behandlats i föreliggande undersökning.
- g) Erosionsrisk hos dammtån: Denna risk är också en funktion av den genomströmmande vattenmängden. Beräkningsmetoder finns anvisade i bl a VASOs rapportserie. En fråga är i vilken grad risken är beräkningsbar m h t topografisk variation i dammens grundläggning och de ingående materialens varierande sammansättning.

På basis av ovanstående bedömning av nuvarande kunskapsnivå dras här slutsatsen att dimensionering inte skall tillåtas enligt princip 2 ovan.

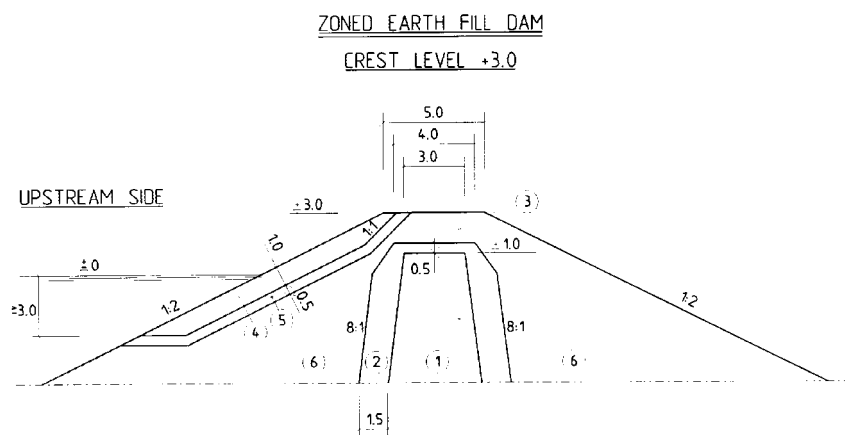
Slutsatsen blir således att fyllningsdammars fribord väljs så att överspolning av krönet eller strömning över tät kärnan ej uppstår. Nuvarande regler för dimensionering av fribord hos fyllningsdammar föreslås därför inte bli ändrade.

7 Referenser

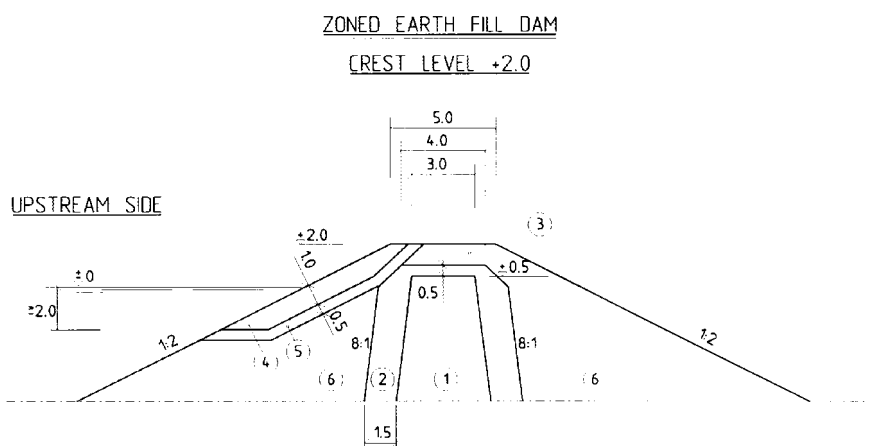
- [1] VASO dammkommittés rapport nr 12, Fyllningsdammars förmåga att tåla överspolande vågor, 1995.
- [2] Hurdle, D.P. and Stive, R.J.H., Revision of SPM 1984 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications, Coastal Engineering, Vol. 12, pp 339-351, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [3] VASO dammkommittés rapport nr 10, Vågor i vattenkraftmagasin, 1995.
- [4] Van der Meer, J.W. and Janssen, J., Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments, Publ. 485, Delft Hydraulics, August 1994.
- [5] CIRIA Special Publication 83/CUR Report 154, Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, 1991.
- [6] Akkerman, G.J., Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps, vertical closure method, Delft Hydraulics, Report M1741-IV, 1985.
- [7] Akkerman, G.J., Stability of open revetment systems at high flow velocities, Delft Hydraulics, Report H1930, 1995.
- [8] VASO dammkommittés rapport nr 11, Erosionsskydd för fyllningsdammars uppströmsslänter
- [9] Vattenfall, Jord- och stenfyllningsdammar, 1988
- [10] RIDAS, Avsnitt 3.2, Fyllningsdammar, Tillämpningsanvisningar, koncept 1997-10-03

8 Figurer

Figur 3.1 Upbyggnad av studerad fyllningsdamm med krönnivå +3,0 m. 1=tätjord, 2=filter, 3=krönöverbyggnad, 4=erosionsskydd, 5=övergångslager, 6=stödfyllning



Figur 3.2 Uppbyggnad av studerad fyllningsdamm med krönnivå +2,0 m. 1=tätjord, 2=filter, 3=krönöverbyggnad, 4=erosionsskydd, 5=övergångslager, 6=stödfyllning



9 Bilagor



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se