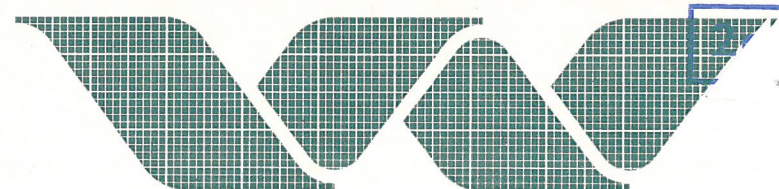


I R 806



waterloopkundig laboratorium

hevels in het delta-gebied

AFGEHANDELD

verslag onderzoek

R 806

maart 1973

1 4 JUNI 1973

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - D

hevels in het delta-gebied

verslag onderzoek

R 806

maart 1973

INHOUD

<u>1. Inleiding</u>	<u>blz.</u>
1.1. Opdracht	1
1.2. Konklusies	1
1.3. Opzet, definities	2
1.4. Samenvatting	3
1.5. Voorbeeld: hevel in een primaire dam	9
1.6. Nader onderzoek	11
<u>2. Algemene beschouwing over hevels</u>	13
2.1. Voor- en nadelen van hevels	13
2.2. Klassifikatie	14
2.3. Ontwerpeisen (algemeen)	16
2.4. Modelonderzoek	21
<u>3. Toepassing in delta-gebied</u>	23
3.1. Keuze heveltype	23
3.2. Keuze uitlaatkonstruktie	24
3.2.1. Algemeen	24
3.2.2. Typen uitlaatkonstrukties	24
3.2.3. Keuze uitlaatkonstrukties	25
3.2.4. Plafondpeil vrije diepgelegen uitlaat	26
3.2.5. Hoogte vrije uitlaat	27
3.2.6. Peil plafond tussen hiel en uitlaat	27
3.2.7. Ontluchtingsschacht	28
3.3. Inlaatkonstruktie	28
3.4. Hevelknie	30
3.5. Vormgeving diverse onderdelen	32
3.6. Aanslaan, afslaan	33
3.7. Debiet in aangeslagen toestand	40
3.8. Drukverdeling in de hevelknie	41
3.9. Afrondingsstraal van de kruin	43
3.10. Druk- en snelheidsfluktuaties door golven	47
3.11. Zeewaterindringing	50
3.11.1. Zeewaterindringing per zeegolf	50
3.11.2. Zeewaterindringing per getij	54
3.11.3. Eigen frekwentie onderbeen	55

	<u>blz.</u>
3.11.4. Rekapitulatie	55
3.12. Kavitasie	56
3.13. Vakuümpomp	58
3.14. Luchtinlaat, debietbegrenzing	61
<u>4. Aanpak hevelontwerp (algemeen)</u>	63
<u>5. Hevelontwerp voor een primaire dam</u>	64
5.1. Variabelen	64
5.2. Schetsontwerp	65
5.3. Enkele berekeningen	65
<u>6. Benodigde gegevens</u>	70
<u>7. Literatuur</u>	72
Appendix I Zeewaterindringing per zeegolf.	75
Appendix II Zeewaterindringing per getij.	78

FIGUREN

1. Definities en symbolen.
2. Zelf-aanslaande hevels met vrije uitlaat (baby-hevel, schans, zwanehals).
3. Uitlaatkonstrukties (stuw en waterslot).
4. Waterstanden Noordzee voor de Oosterschelde-dam.
- 5a. Afrondingsstraal van de kruin als functie van het debiet.
- 5b. Afrondingsstraal hevelknie als functie van het debiet.
6. Weerstandskoëfficiënten.
7. Debiet als functie van verlieskoëfficiënt.
8. Watersnelheden als functie van het verval.
9. Snelheidsverdeling over de vertikaal in de hevelknie.
10. Druk hevelknie als functie van de hoogte van kruin en kroon boven de bovenwaterstand.
11. Druk hevelknie als functie van de kniehoogte.
12. Verval, verlieskoëfficiënt en inlaat + bochtverliezen als functie van de druk in de hevelknie.
13. Druk hevelknie als functie van de plaats van de hevelknie.
14. Waterstanden en vakuümpompkapaciteit.
15. Pompkapaciteit als functie van de kroonhoogte.
16. Debietreduktie door beluchting.
17. Energiehoogten.
18. Kavitasie-inceptiegetallen.
19. Schetsontwerp.

1. Inleiding

1.1. Opdracht

Op de vergadering van 10 augustus 1972 gaf de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst der Rijkswaterstaat opdracht aan het Waterloopkundig Laboratorium een diskussienota op te stellen waarin de toepassingen, mogelijkheden en beperkingen van hevels in het algemeen en de bruikbaarheid van hevels in de Oosterschelde-dam (programma van eisen, schetsontwerp, benodigde gegevens) in het bijzonder zouden worden samengevat.

Deze diskussienota werd besproken op de vergadering van 17 oktober 1972. Op deze vergadering werd besloten de nota verder uit te breiden, door er de opzet van enkele berekeningen in op te nemen, waarmee in een later stadium een aantal aspecten, die een rol spelen bij een algemeen ontwerp van hevels, kunnen worden uitgewerkt.

Het hiernavolgende verslag omvat zowel de diskussienota als de berekeningsopzet. De studie werd uitgevoerd door ir. P. van Groen, die tevens dit verslag schreef.

Voor het verder uitwerken van de berekeningen zal voortgezet onderzoek verricht dienen te worden.

1.2. Konklusies

- Toepassing van hevels in het deltagebied is zowel bij de primaire als bij de sekundaire dammen mogelijk.
- Bij de hoge hevel (i.v.m. de hoge buitenwaterstanden bij de primaire dammen) treden lage drukken op waardoor kavitatie in verband met mogelijke wandbeschadiging bekeken moet worden. Eventueel zal de hevelknie van een stalen binnenbekleding moeten worden voorzien.
- Door de toename van luchtvolume en opvoerhoogte bij een toenemende hoogte van de hevelknie zal de benodigde pompkapaciteit (van de vakuüm-installatie waarmee de hevel wordt aangeslagen) groter worden.
- Om de hevelknie niet te hoog te maken zal bij hoge buitenwaterstanden enige zeewaterindringing (golfoverslag) plaatsvinden. Door overdruk in de hevelknie in te stellen kan dit voorkomen worden.
- Om de drukken niet extra te verlagen moet de hevel niet met een diffusor worden uitgerust. Hierdoor zullen de energieverliezen groter en de afvoercoëfficiënt kleiner zijn dan die van een diffusor-spuisluis;

- de heveldoorsnede moet daarom in verhouding groter worden.
- De keuze van het heveltype en de uitlaatkonstruktie worden o.a. door konstruktieve aspecten bepaald. Verschillende mogelijkheden staan in het rapport vermeld.
 - Een mogelijk ontwerp van een kroonhevel die in de primaire dammen , toegepast kan worden, is in dit rapport gegeven; zie ook figuur 19.

1.3. Opzet, definities

Mede omdat de Nederlandse literatuur met betrekking tot hevels beperkt is, zijn de (in deze nota) gehanteerde begrippen in figuur 1 gedefinieerd. In dezelfde figuur zijn de gebruikte symbolen verklaard.

Indien een debiet afgevoerd moet worden onafhankelijk van de bovenwaterstand wordt van debietregeling-, indien een hevel moet gaan werken als een bepaalde bovenwaterstand wordt overschreden, wordt van waterstandsregeling gesproken.

Aan de hand van een algemene beschrijving van hevels in hoofdstuk 2 (voor- en nadelen, klassifikatie, ontwerpeisen en modelonderzoek) worden in hoofdstuk 3 een aantal aspecten besproken die bij het ontwerp van een hevel in het deltagebied van belang zijn, waarbij in eerste instantie gedacht is aan hevels in de primaire dammen. In hoofdstuk 4 wordt een globale aanpak geschetst om tot een hevelontwerp te komen. Als voorbeeld wordt in hoofdstuk 5 een schetsontwerp gemaakt van een hevel in een primaire dam. De gegevens die bij het schetsontwerp nodig zijn, zijn in hoofdstuk 6 samengevat. Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van de geraadpleegde literatuur.

In de samenvatting (1.4.) wordt een globaal overzicht gegeven van de inhoud van hoofdstuk 2 t/m 5. In het voorbeeld (1.5.) worden een aantal overwegingen genoemd die bij het schetsontwerp (figuur 19 en hoofdstuk 4) een rol hebben gespeeld; bovendien worden hier een aantal algemene aspecten genoemd die voor nader onderzoek in aanmerking komen.

In dit verslag wordt een literatuurverwijzing met de volgende codering aangeduid: [...] .

1.4. Samenvatting

Parallel aan de inhoudsopgave wordt hier een samenvatting gegeven van hetgeen in de hoofdstukken 2, 3, 4 en 5 behandeld wordt. Tussen haakjes staan de betreffende paragrafen vermeld waarnaar verwezen wordt.

Hevels, algemeen (2).

In 2.1. wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste voor- en nadelen van een hevel t.o.v. andere spuikonstrukties (zoals spuisluis, grondduiker, etc.). Afhankelijk van o.a. de druk, de hoofdkonstruktievorm, de manier waarop de hevel wordt aangeslagen en de uitlaatkonstruktie kunnen de hevels geklassificeerd worden (2.2.). Hoofdstuk 2.3. geeft een aantal primaire ontwerpeisen. Dit hoofdstuk kan gebruikt worden als een "checklist" waarin een aantal belangrijke aspecten genoemd worden die een rol spelen bij het hevelontwerp. (Deze aspecten worden in hoofdstuk 3 verder uitgediept.)

Facetten die voor modelonderzoek in aanmerking komen en de moeilijkheden die hierbij kunnen optreden worden in 2.4. genoemd.

Keuze heveltype in deltagebied (3.1.)

Een voorkeur wordt uitgesproken voor een mechanisch aangeslagen hevel met een vakuümpomp. Voor een algemeen hevelontwerp voor het deltagebied kan geen definitieve keuze tussen een trechterhevel en een kroonhevel gedaan worden.

Enerzijds kan een nadeel van een trechterhevel zijn, dat over de totale hevellengte een vrij diepe doorsnijding van de waterkering gemaakt moet worden (extra veiligheidsvoorzieningen in bouwfase, doorsnijden van obstakels zoals een blokkendam). Anderzijds geldt evenwel, dat een kroonhevel in twee richtingen en een trechterhevel alleen in één richting kan aanslaan.

Of dit in het voordeel of in het nadeel van een bepaald heveltype is hangt van de ontwerpeisen af. Ter beperking van dit verslag wordt in het volgende alleen over kroonhevels gesproken.

Omdat de hevel onafhankelijk van de bovenwaterstand aangeslagen moet kunnen worden is een mechanisch aangeslagen hevel nodig.

Een vakuümpomp heeft o.a. het voordeel dat de hevel bij geringe vervallen aangeslagen kan worden. Een aantal voorzieningen dat getroffen moet worden

om de hevel gemakkelijker zelf aan te laten slaan (zoals (grote)ontluchtingsschacht en/of een schans) vervalt hierdoor. De hevelvorm wordt minder kritisch met betrekking tot het aanslaan.

Wel zal een kleine ontluchtingsschacht nodig zijn als een lange horizontale leiding wordt toegepast, om lucht die uit het water vrijkomt af te voeren.

Uitlaatkonstruktie (3.2)

Uit de besproken mogelijkheden kan geen definitieve keuze gemaakt worden. Bij brede hevelbatterijen komt vooral de verdronken uitlaat met stuw (woelbak) in aanmerking. Bij grote afstand tussen uitlaat en hiel is het waterslot een mogelijkheid. Om dit verslag te beperken wordt hier voorlopig gekozen voor de meest algemene oplossing: de vrije diepliggende uitlaatkonstruktie.

Plafondpeil vrije uitlaat (3.2.4)

Bij het vaststellen van het plafondpeil van de vrije uitlaat is de laagste buitenwaterstand (inklusief zeegolven) waarbij de hevel aangeslagen moet kunnen worden maatgevend; indien lagere buitenwaterstanden verwacht worden moet de hevel tijdig aangeslagen worden.

Eerste uitgangspunt: indien wordt geaccepteerd dat de hevel bij lage zeestanden niet kan worden aangeslagen (in de regel zal de hevel bij afgaand water aangeslagen worden, zodra voldoende verval aanwezig is), dan worden de konstruktievormen vereenvoudigd en de aanlegkosten gereduceerd. Het andere uitgangspunt: de hevel moet altijd aangeslagen kunnen worden, leidt tot een veel lager liggend uitlaatplafond.

Voor het schetsontwerp (1.5 en 4) werd het eerste uitgangspunt gehanteerd. De konsekwentie hiervan is wel dat het aanslaan bij grote vervallen begrensd is (bijv. van belang als een spuigeul door een groot debiet vrijgehouden moet worden).

Uitlaathoogte, afstand plafond-vloer (3.2.5)

De uitlaathoogte en de uitlaatvorm is vooral een zaak van bodemverdediging en uitstroomkondities. Deze problemen zijn vergelijkbaar met die zich bij grondduikers voordoen. Een en ander wordt in dit verslag niet verder uitgewerkt.

Plafondpeil tussen hiel en uitlaat (3.2.6)

Indien een laaggelegen vrije uitlaat wordt toegepast kan het plafondpeil tussen hiel en uitlaat hoger liggen dan het uitlaatplafond, nl. overeenkomend met de laagste waterstand (maar nu exclusief zeegolven), waarbij de hevel nog aangeslagen moet kunnen worden.

Ontluchtingsschacht (3.2.7)

Bij een relatief hoog plafond tussen hiel en uitlaat en een diep gelegen uitlaat is een ontluchtingsschacht nodig, indien men het zelf aanslaan wil bevorderen en de vakuümpompkapaciteit enigszins wil beperken. Bij het bepalen van afmetingen en plaats van deze schacht moet er voor gezorgd worden dat de eigen slingertijd van het systeem met de schacht buiten de gangbare golfperiodes ligt. Een kleine ontluchtingsschacht kan nodig zijn om ophopingen van gas, ontstaan door het vrijkomen uit het water, te voorkomen.

Inlaatkonstruktie (3.3)

Het plafondpeil moet zover onder de laagste bovenwaterstand (waarbij gespuid moet worden) (inklusief golven en afwaaiing) gelegde worden dat geen luchtaanzuiging plaatsvindt. De grootte van de overdiepte is sterk afhankelijk van de vormgeving van de inlaat. Een minimale konstruktiehoogte met bijbehorende peilen kan berekend worden indien van een minimum inlaat-vloerpeil wordt uitgegaan. Indien de knie onder overdruk gezet moet worden i.v.m. zeewaterindringing kan het inlaatplafond hierdoor verlaagd moeten worden.

Bij de inlaat moeten voorzieningen getroffen worden om vooral drijvend grof vuil en ijs te weren.

Hevelknie (3.4)

De kruinhoogte wordt bepaald door de optredende drukken (3.9) die van belang zijn i.v.m. de kans op kavitatie (zie ook 3.12), de zeewaterindringing (3.11) en de vakuümpompkapaciteit (3.13).

Bij voorkeur zal de hevelknie zo dicht mogelijk bij de inlaat gelegd worden omdat de drukken daar maximaal zijn (ligging energielijn), de indringing van zeewater dan verminderen zal (demping) en de drukvariatie door golven kleiner zal zijn (als golven op benedenwater groter zijn dan op bovenwater). Bovenstaande geldt slechts gedeeltelijk bij tweezijdig gebruik van de hevel.

Overwogen kan worden om bij hogere zeestanden het binnen-
dringen van zeewater tegen te gaan door de lucht in de hevelknie onder
overdruk te zetten. Hiermee kan het kniepeil verlaagd worden hetgeen
gunstig werkt op de benodigde vakuümpompkapaciteit terwijl ook de
kavitatiegrens gunstiger komt te liggen.

Vormgeving (3.5)

Een wijde inlaat, een ruimbovenbeen en een glad afgewerkte knie ver-
kleinen de kans op kavitatie. Vormgeving en plaats van de luchtinlaat
en vakuümpompaansluiting zo te kiezen dat zo weinig mogelijk lucht-
ophoping plaatsvindt. Ook kan door een goede vormgeving van de hevel,
daar waar het plafond tussen hiel en uitlaat omlaag buigt naar de uit-
laatopening, luchtophoping voorkomen worden.

Aanslaan/afslaan (3.6)

De snelheid van aanslaan hangt o.a. af van de geïnstalleerde vakuüm-
pompkapaciteit, de waterhoogte boven de kruin waarbij de hevel zelf zal
aanslaan, de snelheid waarmee lucht wordt meegezogen hetgeen o.a. af-
hangt van het minimum beschikbare verval om de hevel te kunnen aanslaan.
Het minimum benodigd verval is gering indien de hevelkonstruktie vol-
doende luchtdicht en de vakuümpompkapaciteit groot genoeg is om het
waterpeil in het bovenbeen tot aan het kroonpeil op te tillen. Bij zelf
aanslaan spelen golfindringing, luchttransportkapaciteit en het begrensd
zijn van de stijgsnelheid van luchtbellen een belangrijke rol. Het
zelf aanslaan wordt bevorderd door een schans bij de kruin en een ont-
luchtingsschacht bij de hiel.

Om het aanslaan te versnellen en/of de pompkapaciteit te reduceren kan
overwogen worden in de hevelknie een zekere onderdruk na het afslaan te
handhaven, waardoor de waterstanden maar net onder het kniepeil dalen:
"gedempt afslaan". Automatiseren van het regelen van de kniedruk op de
waterstanden is dan noodzakelijk. Omdat een zekere onderdruk aanwezig
blijft in de hevelknie, ook tijdens hoog benedenwater, moet extra aan-
dacht aan de luchtdichtheid van de hevelkonstruktie worden besteed.

Er bestaan systemen waarbij (op voorwaarde dat er verval aanwezig is)
de ene hevel de andere laat aanslaan. Ook is het mogelijk of per hevel
één vakuümpomp te plaatsen, of met één pomp achtereenvolgens de hevels
te laten aanslaan.

Debiet in aangeslagen toestand (3.7)

In figuur 6 worden weerstandskoefficienten geschat. In figuur 7 wordt de relatie gegeven tussen verval en debiet afhankelijk van de verlieskoefficient. Figuur 8 geeft het verband tussen verval en gemiddelde snelheden.

Drukverdeling in de hevelknie (3.8)

Het snelheidsverloop (en daarmee het verloop van de druk) over de vertikaal in de hevelknie is afhankelijk van het verloop van de kromtestraal tussen kruin en kroon (zie figuur 9).

De drukken in de vertikaal zijn verder afhankelijk van de bovenwaterstand en het kniepeil (figuur 10), kniehoogte (figuur 11), het verval (figuur 12) en de plaats van de hevelknie (figuur 13).

Afrondingsstraal van de kruin (3.9)

Op twee manieren kan geprobeerd worden de straal te optimaliseren. Ten eerste kan worden uitgegaan van een konstante druk over de vertikaal (gunstig in verband met luchttransport); ten tweede van gelijke getallen van Thoma (gelijke kans op kavitatie).

De eerste manier klopt alleen voor een bepaald verval; de tweede manier gaat op voor bepaalde combinaties van verval en waterstanden.

Ter verkleining van het luchtvolume in afgeslagen toestand en om de kans op luchtopeenhoping bij de kroon in aangeslagen toestand te vermijden, is toepassing van een kleine kniestraal aan te bevelen.

Druk- en snelheidsfluctuaties door golven (3.10)

Uitgaande van een eerste orde golftheorie wordt de druk- en snelheidsfluctuatie door golven bij aangeslagen hevel bepaald. Gerekend wordt met golven aan één zijde van de hevel. Het drukverloop wordt recht evenredig verlopend met de afstand vanaf de stil-water zijde aangenomen.

Zeewaterindringing (3.11)

Er wordt in dit hoofdstuk van uit gegaan dat bij een goede vormgeving en luchtinlaat de hevel niet in tegengestelde richting mag kunnen aanslaan bij hoge buitenwaterstanden plus zeegolven.

Zowel voor het geval dat de gemiddelde waterstand boven en onder de kruin staat, wordt het ingedrongen zeewatervolume voor één korte golfperiode berekend (3.11.1 en Appendix I.).

In 3.11.2 wordt de zeewaterindringing per getij besproken. De ontwikkelde formule wordt in Appendix II. numeriek opgelost.

De formule voor de eigenfrequentie van het water in de uitlaat en het onderbeen wordt berekend (3.11.3), terwijl in 3.11.4 een samenvatting wordt gegeven van de zeewaterindringingsproblematiek. Een mogelijkheid om indringing van zeewater te vermijden is de hevelknie onder overdruk te zetten (met behulp van vakuümpomp).

Kavitatie (3.12)

Uit de drukken en snelheden in de hevelknie kunnen kavitatiegetallen berekend worden. Liggen deze getallen boven 2 dan lijkt de hevel kavitatieveilig. Zijn de getallen (bij gangbare vervallen) ongeveer 0 dan zal het ontwerp aanzienlijk gewijzigd moeten worden. Kavitatiegetallen tussen 0 en 2 zullen vergeleken moeten worden met door nader onderzoek te bepalen kavitatie-inceptiegetallen (begin van kavitatie).

Vakuümpomp (3.13)

Een formule wordt afgeleid voor de pompkapaciteit, uitgedrukt in lucht-volume in de hevelknie, gewenste tijdsduur van aanslaan en de overstorthoogte boven de kruin waarbij de hevel zelf aanslaat (zie ook figuur 14 en 15).

Debietbegrenzing (3.14)

Het debiet kan door middel van het inlaten van lucht begrensd worden. De moeilijkheden die hierbij op kunnen treden worden in 3.14 besproken. De mogelijkheden om het debiet te begrenzen zijn beperkt (zie onder andere figuur 16).

Aanpak hevelontwerp (4)

In een kort overzicht wordt de aanpak van een hevelontwerp gegeven.

Ontwerp (5)

Met de hiervoor genoemde gegevens is een hevelontwerp gemaakt voor een primaire dam. Een aantal peilen en afmetingen zijn geschat omdat of de ontwerprelaties nog verder uitgewerkt moeten worden of omdat onvoldoende gegevens beschikbaar waren (zie ook 1.5). De bij dit ontwerp gehanteerde uitgangspunten staan in 1.5 (zie ook figuur 19).

Benodigde gegevens(6)

Een aantal aspecten die bij het hevelontwerp van belang zijn kunnen nog verder uitgewerkt worden. De verdere uitwerking hangt sterk af van de vorm waarin een aantal gegevens beschikbaar worden gesteld. Om welke aspecten, gegevens en vorm het hier gaat wordt in hoofdstuk 6 besproken (zie verder 1.5).

1.5. Voorbeeld:

Hevel in een primaire dam (5)

Aan de hand van het schetsontwerp van een hevel voor een primaire waterkering in het deltagebied kan worden nagegaan in hoeverre met behulp van dit verslag een hevelontwerp gemaakt kan worden (zie ook 4 en 5.3).

De volgende aannamen, overwegingen en berekeningen hebben tot dit ontwerp geleid:

- Gekozen is voor een mechanisch aangeslagen kroonhevel met vakuümpomp en vrije diepliggende uitlaat (zie figuur 19).
- De beschikbare breedte is relatief klein verondersteld (hoge kokers, geen verdrongen uitlaat met stuw), voor het profiel van de dam is het normaalprofiel van de Oosterschelde-dam genomen, het profiel is zoveel mogelijk in takt gelaten (lange hevel).
- De laagste waterstanden (exklusief zeegolven) waarbij de hevel aangeslagen moet kunnen worden zijn voor het bovenwater N.A.P.-1 m (inclusief afwaaiing) en voor het benedenwater N.A.P.-2 m.

De bijbehorende overschrijdingslijnen van de zeegolven zijn niet bekend.

De voor het in- en uitlaatplafond maatgevende golfhoogten zijn geschat (statistische berekening mogelijk).

- Een lijst van (te verzamelen) maatgevende golfhoogten en waterstanden staat in hoofdstuk 6.
- Als gewenst debiet werd gedacht aan $600 \text{ m}^3/\text{s}$ bij 1 m verval.
- De plaats van de hevelknie is boven de blokkendam vlak achter de inlaat gekozen.
- Het kruinpeil is op N.A.P.+4m gelegd.

De ligging hangt onder andere af van de toelaatbare zeewaterindringing.

Na uitwerking van appendix I en II en formulering van wat toelaatbaar is, kan worden bepaald of deze hoogte akseptabel is, of dat wellicht

tot zeewaterbestrijding door overdruk moet worden overgegaan.

- De inlaatopening is zo laag gelegd, dat luchtaanzuigen niet voor kan komen (golfgegevens bovenwater nodig). Bij een bovenwaterstand van N.A.P.-1m en een golfhoogte van 3 m wordt, rekening houdend met 5x de snelheidshoogte ($=5 \times 0,5 \text{ m}$), het inlaatplafond op N.A.P.-5m gelegd.
- Gerekend is, dat de hevel bij een benedenwaterstand van N.A.P.-2m en een bijbehorende maatgevende golfhoogte van 6 m nog kan worden aangeslagen.

Daarom is het uitlaatplafond op N.A.P.-5 m en het plafond tussen hiel en uitlaat op N.A.P.-2 m gelegd.

- Het uitlaatplafond ligt soms boven water, zodat met golfbelasting rekening gehouden moet worden.
- Omdat een aantal elementen die voor het ontwerp nodig zijn niet bekend zijn: beschikbare breedte, konstruktieve en economische aspecten, kan de vaststelling van de hevelkniehoogte hier slechts geschat worden (op 3,5 m).
- Om de gedachten te bepalen is gerekend met 8 hevels met een knie-doorsnede van $7,5 \times 3,5 \text{ m}$, die vlak naast elkaar (beperkte breedte) maar wel los van elkaar (funderingstechnisch voordeel) gelegd worden. Bij een totale verliescoëfficiënt $\sum \zeta = 2,2$ geldt dat q bij 1 m verval $10,5 \text{ m}^2/\text{s}$ is.
- De afrondingsstraal van de kruin wordt op 3,5 m gehouden.
- Voorlopig wordt aangenomen dat de totale vormgeving (hoge hevelknie, grote afstand tussen hiel en uitlaat, diepe uitlaat) minder kritisch is omdat de vakuümpomp het bovenwater tot de kroon moet kunnen tillen, voordat de hevel zelf behoeft aan te slaan.

Konstrukties die het zelf aanslaan bevorderen zijn daarom voorlopig minder zinvol, zoals: schanskonstruktie, grote ontluchtingsschacht, een diepgelegen naar de uitlaat toe oplopende koker etc.

Tegenover deze kostenbesparende vereenvoudigingen staat een waarschijnlijk grotere benodigde pompkapaciteit.

- Bij een buitenwaterstand van N.A.P.-3,9 m (onderschrijdingskans 10^{-4} , figuur 4) en een bovenwaterstand van N.A.P.+1m (opwaaiing) komt bij de kruin een druk van -8,3 mwk en een kavitatiegetal van 0,3 voor. Door de drukfluctuaties van golven nemen deze waarden nog verder af. De drukken zijn zo laag dat onderzoek naar kans op kavitatie gewenst is. Ter beperking van wandkavitatie verdient een gladde kniewand de voorkeur.

- Bij een maximaal luchtvolume van 600 m^3 en een hevel die pas zelf aanslaat als het water de kroon raakt is een vakuümpompkapaciteit van $2 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig om de hevel in 8 min te kunnen aanslaan. Het maximaal volume komt voor bij een bovenwaterstand van N.A.P.-1 m en een benedenwaterstand van N.A.P.-2 m. Gerekend is op het heersen van atmosferische druk in de hevelknie na het afslaan, in tegenstelling tot het "gedempt afslaan" zie (3.6).
- Indien de vakuümpomp de waterstand tot aan de kroon kan optillen, kan de hevel reeds bij gering verval aangeslagen worden. De pomp kan gestart worden nog voor het minimum verval aanwezig is.
- Bij extreem lage buitenwaterstanden worden de uitstroomcondities slechter, vooral als de uitlaat boven water komt. Met de bodemverdediging zal hiermee moeten worden rekening gehouden.
- De hierboven genoemde getallen zijn ontleend aan het rekenvoorbeeld van hoofdstuk 5.3.

1.6. Nader onderzoek

Aspekten die ten behoeve van een algemeen hevelontwerp voor het delta-gebied met behulp van een komputer nader uitgewerkt dienen te worden zijn:

- Zeewaterindringing (zie Appendix I. en II.).
- Drukken, snelheden en kavitatiegetallen als functie van onder andere afrondingsstraal, waterstanden, peilen en golven (zie ook de figuren 5 t/m 13).
- Aan bovengenoemde aspecten en aan het bepalen van plafondpeilen zullen statistische waterstandsgegevens gekoppeld moeten worden.

Modelonderzoek ten behoeve van een algemeen hevelontwerp moet zich vooral richten op:

- Bepalen van kavitatie-inceptiegetallen.
- Benodigde waterstanden boven de kruin en minimale vervallen voor het zelfaanslaan.
- Snelheid van aanslaan: onder andere vormgeving bij de knie en luchttransport (werking schans, enigszins verlaagde hiel, ontluuchttings-schacht, kromming van de kruin, luchtinlaat, plaats vakuümpompaansluiting).

- Inlaatvorm (luchtaanzuigen), uitlaatvorm (bodemverdediging).
- Afvoerkapaciteit (verliezen).
- Zie ook 2.4.

Gezien de geringe ervaring die op het gebied van hevels beschikbaar is en de grote investering die voor een dergelijk kunstwerk nodig is, is het gewenst het onderzoek naar de vormgeving af te ronden met een model op grote schaal (eventueel prototype afmetingen) van het hooggelegen deel van de hevel om hier de tijd van aanslaan, eventueel benodigde ontluchting en kavitatie te verifiëren.

2. Algemene beschouwing over hevels

Om tot een ontwerp te komen is eerst een algemene literatuurstudie over hevels gemaakt. De voornaamste resultaten van dit oriënterende onderzoek worden in het volgende samengevat.

2.1. Voor- en nadelen van hevels ten opzichte van andere spuikonstrukties

Voordelen

2.1.1. Omdat hoofdwaterkeringen niet dan met veel voorzorgen doorsneden mogen worden kunnen hevels soms de voorkeur hebben boven andere spuikonstrukties zoals spuisluis, grondduiker, etc.

2.1.2. Een beperking van de hoeveelheid grondverzet.

2.1.3. Een hevel lekt niet in afgeslagen toestand.

2.1.4. Een minimum aan bewegende delen.

2.1.5. In aangeslagen toestand heeft een hevel een veel groter debiet per m' kruinbreedte dan een overlaat en eenzelfde afvoer karakteristiek als een grondduiker.

2.1.6. Door beluchten wordt kwaliteitsverbetering van water bereikt.

2.1.7. Een hevel is zeer geschikt voor niveauregeling (zelfaanslaande hevel toepassen).

2.1.8. Grof zwevend vuil kan worden afgevoerd.

Nadelen

2.1.9. Minder geschikt voor debietregeling tenzij een baby-hevel of vakuümpomp toegepast wordt; niet geschikt voor fijnregeling debiet.

2.1.10. IJsafzetting, door vrije waterspiegel in de hevelbenen in afgeslagen toestand.

2.1.11. Er zijn vaak extra voorzieningen nodig om de hevel te kunnen aanslaan (onder andere onderbeen afgesloten houden met stuw, woelbak, waterslot of zwanehal; baby-hevel; schanskonstruktie; zie de figuren 2 en 3).

2.1.12. Bij grote kruinhoogte kavitatieproblemen.

2.1.13. Voor modelonderzoek aan een aantal facetten zoals snelheid van aanslaan (steilheid translatiegolven), beluchtingscapaciteit en kavitatatie is een groot model nodig (schaal 1:1, of tenminste de verticale schaal 1:1) of eventueel een kleiner model in een vakuümtank. Voor facetten zoals afvoerkapaciteit, vormgeving, golfdoordringing, ontgronding en zout-zoet kan met een kleiner model volstaan worden.

2.2. Klassifikatie

Een deel van de hier gebruikte klassifikatie komt overeen met [3].

2.2.1. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen:

- hevels met een klein verval
- hevels met een groot verval

De grens wordt bij een verschil in boven- en benedenwaterstand van 10 m gelegd [3]. Het onderscheid is niet essentieel.

Beter is niet het verval maar de absolute druk in de aangeslagen hevel als uitgangspunt te gebruiken: hevels waarbij het verval zo groot is dat de absolute druk in valpijp of onderbeen nul is, waardoor de waterkolom breekt en een "watervalzone" op zal treden worden dan hevels met een groot verval genoemd.

2.2.2. Afhankelijk van de hoofdkonstruktievorm kunnen twee heveltypen onderscheiden worden:

- kroonhevel (hood, crown, saddle siphon)
- trechterhevel (volute siphon)

Het konstruktieve verschil is schematisch aangegeven in figuur 1.

De bovenkant van de knie wordt kroon genoemd vandaar kroonhevel. Het overstortende water bij de trechterhevel wordt door schoepen (op de binnenkant van de trechter) in een spiraalbeweging gebracht (vergroot de luchttransportcapaciteit).

Met een trechterhevel kan in één richting, met een kroonhevel kan in twee richtingen gespuid worden.

2.2.3. Afhankelijk van het systeem van aanslaan onderscheidt men:

- zelfaanslaande hevels
- mechanische aangeslagen hevels

Bij zelfaanslaande hevels wordt het aanslaan geïnduceerd door de bovenwaterstand; ze zijn dus geschikt voor niveauregeling.

Wanneer men geheel of gedeeltelijk onafhankelijk van de bovenwaterstand wil werken zijn mechanisch aangeslagen hevels nodig: gestuurde afsluiter in een lager gelegen baby-hevel, beweegbare schans, vakuumpomp.

2.2.4. In de literatuur (zie onder andere [18]) worden hevelkonstrukties ook onderscheiden naar het type uitlaatkonstruktie.

Men onderscheidt hevels met

- vrije uitlaat en
- verdrongen uitlaat.

Ter begrenzing van het maximale debiet en/of ter beperking van de konstruktiediepte wordt de uitlaat van de hevel dikwijls boven de laagst voorkomende (of mogelijke) benedenwaterstand gelegd. Indien bij deze waterstanden het luchtvolume in de hevelknie (als de hevel is afgeslagen) via de uitlaat in open verbinding staat met de buitenlucht wordt van vrije uitlaat gesproken.

Toepassing van bijvoorbeeld een combinatie van vrije uitlaat en een vakuumpomp houdt de onmogelijkheid in de hevel te kunnen aanslaan bij lage benedenwaterstanden, tenzij de bovenwaterstand zover boven het kruinpeil staat dat de hevel zelf aanslaat. Mogelijkheden van een vrije uitlaat bij zelfaanslaande hevels worden in figuur 2 geschetst. Een van deze mogelijkheden is bijvoorbeeld de zogenaamde zwanehalskonstruktie. Indien hierbij de bovenwaterstand tot boven de kruin stijgt wordt een overlaattoestand verkregen, die de hals afsluit.

De watersprong die ontstaat kan voldoende lucht meezuigen zodat geen verdere maatregelen aan de kruin nodig zijn om de hevel zelf te laten aanslaan (zie figuur 2).

Voorbeelden van een verdrongen uitlaat zijn de stuw en het waterslot (zie figuur 3).

2.2.5. Een verdere indeling van hevels is mogelijk op grond van voorzieningen met betrekking tot het luchtvolume in knie of koepelruimte of met betrekking tot de capaciteit van het lucht meezuigen. Men onderscheidt kroonhevels met

- baby-hevels (figuur 2)
- schanskonstruktie (figuur 2)
- stuw of woelbak (figuur 3)
- waterslot (figuur 3)

- zwanehals (figuur 3)
- ontluchtingsschacht.

De trechterhevels hebben extra voorzieningen om het zelf aanslaan te bevorderen namelijk:

- schoepen in de trechter (meest gangbaar)
- schoepen aan de buitenzijde van de trechter
- zonder schoepen maar met een schanskonstruktie.

Door het luchtvolume klein te houden kan het aanslaan van hevels versneld worden (dit is ook met schans- of baby-hevels te bereiken).

Luchtlekkages kunnen vermeden worden door in- en uitlaat voldoende diep onder water te leggen, een stuw, waterslot of zwanehals-konstruktie toe te passen.

Door een ontluchtingsschacht toe te passen wordt gezorgd dat de aanvankelijk meegevoerde hoeveelheid lucht niet terug kan stromen, maar snel wordt afgevoerd, waardoor de hevel eerder zal aanslaan.

In hoofdstuk 3 komen deze konstruktiemogelijkheden uitgebreider aan de orde bij de keuze van een hevel voor een dam in het deltagebied.

2.3. Ontwerpeisen (algemeen)

2.3.1. Kniepeilen. Om de hevel te kunnen aanzuigen zal de waterstand in de hevelknie waarbij de hevel zelf aanslaat, minder dan 10 m boven de bovenwaterstand moeten liggen.

Bij de aangeslagen hevel moeten kruin- en kroonpeilen minder dan 10 m boven de lokale drukhoogte liggen (kavitatie).

2.3.2. Inlaat, voldoende diep onder water leggen (laagste waterstand + aantal malen de snelheidshoogte + golven). Inlaatsvorm zo kiezen dat een minimum aan turbulentie optreedt (in verband met kavitatie).

2.3.3. Debiet van de aangeslagen hevel berekenen als een gesloten leiding.

Verliezen kunnen door ruime bochten, gladde wand en vermijden van sponningen beperkt worden. Het overstortende debiet (voor het aanslaan) als overlaat berekenen.

2.3.4. Bij waterstandsregeling is een zelfaanslaande hevel toe te passen met kruinhoogte of trechterrandhoogte op de bovenwaterstand.

2.3.5. Indien de hevel onafhankelijk van de bovenwaterstand moet kunnen aanslaan (debietregeling) is een mechanisme ten behoeve van het aanzuigen nodig zoals een afsluiter in een baby-hevel, een vakuümpomp, etc. Hiervoor is wel een minimum verval nodig.

2.3.6. De kromming van de knie wordt in het algemeen zo gekozen dat de drukvariatie over de vertikaal minimaal is. Het drukverschil tussen kroon en kruin ten gevolge van de zwaartekracht kan men door het drukverschil ten gevolge van de centrifugaalkracht laten opheffen; hiermede wordt voorkomen dat lucht zich in de lage drukzône verzamelt. Voor relaties tussen kromming en debiet zie ook [5]. In dit verslag wordt een andere mogelijkheid voorgesteld (zie hoofdstuk "afrondingsstraal hevelknie") waarbij de kavitatie-inceptie overal gelijk ligt.

Een en ander zal eveneens bekeken moeten worden in verband met mogelijke instabiliteit door luchtophoping in de knie (zie ook 2.3.16).

2.3.7. Het aanslaan van een hevel is alleen mogelijk indien het luchtvolume in de knie of onder de koepel tijdens het aanslaan geen open verbinding met de buitenlucht heeft. Hiertoe moet of de uitlaat onder water gebracht worden (zie 2.3.9) of het water in het onderbeen van de hevel moet voor een voldoende afscheiding zorgen. Een andere mogelijkheid is een afsluiter in het onderbeen.

De inlaat moet altijd onder de bovenwaterstand liggen.

2.3.8. Snel aanslaan. Ingeval van een zelfaanzuigende kroonhevel (regeling op waterstand) moet de lucht meegenomen kunnen worden uit de knie. Bevorderend werkt: kleine knieruimte, laag kroonpeil, kort onderbeen (steil), achter de hiel een ontluchtingsschacht, hiel niet te laag, oplopende uitlaatkonstruktie (zie ook 2.3.11).

Een andere mogelijkheid is het gebruik van een schans waardoor een waterstraal in het onderbeen oversteekt; hierbij is een rechthoekige dwarsdoorsnede van het onderbeen essentieel. Ook kan een baby-hevel voor dit doel worden toegepast.

2.3.9. Indien bij het aanslaan lucht via de uitlaat kan worden aangezogen (bij lage benedenwaterstanden), kan ter beveiliging de benedenwaterstand begrensd worden door middel van een stuw of woelbak.

Een voordeel is dat ook een debietbegrenzing ontstaat en er minder golfdoordringing is; een nadeel is de (dure) overstortkonstruktie.

2.3.10. Bij een uitlaat van een kroonhevel boven de benedenwaterspiegel kan onder andere (zie 2.2.4) gedacht worden aan een zwanehalskonstruktie of een waterslot (zie figuur 2). Bij de zwanehalsluit een neer het onderbeen af als de hevel als overlaat werkt, terwijl bij een waterslot het onderbeen is afgesloten ook als de hevel niet werkt. De zwanehals is in het algemeen alleen te gebruiken bij zelfaanslaande hevels, omdat in afgeslagen toestand de knieruimte via de uitlaat in open verbinding met de buitenlucht staat.

De minder voor de hand liggende combinatie van een mechanisch bediende baby-hevel en een vrije uitlaat met zwanehalskonstruktie is een uitzondering hierop.

Het waterslot is zowel bij mechanisch aangeslagen- als bij zelfaanslaande hevels te gebruiken. Door de vereiste berging in het waterslot (geen luchtlekkage tijdens aanzuigen) is de benodigde konstruktie-lengte tussen hiel en uitlaat bij het waterslot aanmerkelijk groter dan bij de zwanehals.

2.3.11. Het afslaan van een hevel moet op ieder moment kunnen worden gerealiseerd door het inlaten van lucht in de knie (of koepel).

Als waterstandsregeling gewenst is kan een zelfaanslaande hevel worden toegepast, de luchtinlaat komt vrij bij te lage waterstand.

2.3.12. Getrapt aanslaan is mogelijk door een aantal baby-hevels toe te passen of (bij zelfaanslaande hevels) een aantal luchtinlaten boven elkaar aan te brengen. De luchtinlaten temperen eveneens het afslaan.

2.3.13. De translatiegolven welke ontstaan bij het aan- en afslaan van de hevel kunnen problemen opleveren in verband met scheepvaart. Door het getrapt aan- of afslaan worden de optredende verhangen minder steil.

2.3.14. Debietregeling

a. Fijnregeling is uiteraard mogelijk indien in de hevel schuiven worden toegepast.

De voor- en nadelen hiervan zijn evident en moeten per geval bekeken worden (zie ook 2.1)

- b. Door lucht via de kruin in te laten (zelfaanzuigend) kan het debiet worden afgeremd. Begrenzen van het maximale debiet kan belangrijk zijn in verband met kavitatie.

De debietreduktie door luchttoevoer kan beperkt zijn door het optreden van instabiliteiten bij grote vervallen waardoor de hevel kan afslaan.

Dit verschijnsel werd geconstateerd bij het W.L.-onderzoek voor Eefde (M 897) [2]; verdere voorbeelden hiervan zijn niet bekend. Het manipuleren met variabele luchtinlaat vereist gestuurde afsluiters in de luchttoevoer (zie verder hoofdstuk 3.14 "debietbegrenzing").

- c. Door een aantal hevels naast elkaar te leggen (eventueel van verschillende capaciteit) kan het debiet in trappen gevarieerd worden.

2.3.15. Luchtinlaten kunnen, zoals gedeeltelijk uit het voorgaande blijkt, worden toegepast in verband met

- reductie van hellingen van translatiegolven bij getrapt aan- of afslaan,
- regeling van de waterstand bij zelf afslaan ("deprimer" zie [3]),
- afslaan,
- debietregeling,
- debietbegrenzing,
- beluchting van water (bij waterzuiveringsinstallaties [1]).

De luchtinlaat kan gekombineerd worden met de toevoer van een vakuümpomp.

2.3.16. Instabiliteiten kunnen in een aantal gevallen optreden:

- een onjuiste hevelvorm waardoor bij grotere afvoer de luchtafvoer in de knie kan stagneren (gevolg: kleiner debiet; grotere watersnelheid: afname van luchtvolume: grotere afvoer: stagneren van luchtafvoer etc.); ook de plaats van een luchtinlaat en de toevoer van een vakuümpomp zijn in verband hiermee belangrijk;
- de mogelijkheid bestaat dat het bovenpand kan gaan opslingeren (aanslaan hevel, zakken bovenwaterstand, afslaan hevel, stijgen bovenwaterstand etc.);
- golven kunnen afwisselend aan- en afslaan veroorzaken;

- toepassing van gestuurde afsluiters bij luchtinlaten; aangezien bij luchtdebieten de hevel in samenhang met het bovenpand al instabiel kan worden, is een afsluiter die in een regelsysteem is opgenomen ook een mogelijke oorzaak van instabiliteiten.

2.3.17. De door golven optredende waterspiegelvariatiën mogen de inlaatopening niet boven water brengen. Tijdens het starten van de hevel moet ook de uitlaat beschermd zijn.

De drukverschillen door golven die bij de in- en uitlaatopening optreden veroorzaken waterstandsvariatiën in de afgeslagen hevel en druk- en debietvariatiën in de aangeslagen hevel. Met de invloed hiervan op kavitatie, zoutindringing en afslaan zal rekening moeten worden gehouden.

2.3.18 In verband met kavitatie zijn de punten van belang genoemd in 2.3.1, 2.3.2, 2.3.6, 2.3.14 b, 2.3.16 en 2.3.17. Een speciaal onderzoek naar de maximale afvoer als deze door volledige kavitatie begrensd wordt is gepubliceerd door K.J. Zanker (6).

Bij kavitatie brak de waterkolom in de knie. Door de watervalzone in het verticale been (geen concentratie van water aan de wanden) en de vrije waterspiegel in het onderbeen traden bij implosie geen sterke drukvariatiën op.

Kavitatieschade werd niet geconstateerd.

2.3.19 Vaste stoffen (ijs, vuil)

Bij een afgeslagen hevel kan gemakkelijk ijsvorming optreden aan de vrije waterspiegel in de hevelbenen. De temperatuurdaling van het water ten gevolge van de temperatuurdaling van de lucht door de optredende onderdruk tijdens het aanslaan (uitgaande van een adiabatische toestandsverandering) is waarschijnlijk te verwaarlozen door de grote verschillen in warmtecapaciteit van water en lucht (zie 2.4).

Om het binnendringen van drijvende vaste stoffen in de hevel te verhinderen zullen maatregelen genomen moeten worden. Voor botsing met zwevende vaste stoffen (ijs, vuil) zijn hevels minder gevoelig, omdat in het algemeen bewegende delen (afsluitmechanisme) ontbreken.

Het volledig vermijden van bevriezing blijft echter een probleem vooral aan de zoete kant van een hevel (verwarming, luchtballen, regelmatig manipuleren met de vakuümpomp?).

2.4. Modelonderzoek

2.4.1. Inleiding

Het schetsontwerp voorvloeiend uit globale berekeningen (zie hoofdstuk 5.3) zal met behulp van modelonderzoek op een aantal punten bijgeschaafd moeten worden.

De facetten die voor modelstudie in aanmerking komen zijn (zie ook 2.1.12):

- a. afvoerkapaciteit,
- b. vormgeving (peilen en doorsneden van hevel en bijvoorbeeld woelbak),
- c. ontgronding,
- d. golfdoordringing,
- e. zout-zoet problemen,
- f. snelheid van aanslaan (capaciteit vakuümpomp, regeling luchtinlaat, steilheid translatiegolven, plaats luchtinlaat en vakuümpomp aansluiting, kruinstraal, hiel-peil, schans, ontluchtingsschacht),
- g. beluchting, (debietregeling, kwaliteitsverbetering en afslaan),
- h. temperatuur (wisselingen door drukverschillen),
- i. kavitatie,
- j. trillingen in de knie.

De punten f, g, h en i zijn karakteristiek voor een hevel, de overige punten van onderzoek komen in het algemeen (soms in enigszins gewijzigde vorm) ook bij andere spuikonstrukties voor.

Het voor deze studie benodigde model zal geometrisch gelijkvormig moeten zijn, terwijl op Froudeschaal gestroomd zal moeten worden. Hierdoor worden een aantal schaafeffekten geïntroduceerd.

2.4.2. Viskositeit in model te groot; fout gering als model niet te klein is.

2.4.3. Lucht in model te stijf; bij toenemende onderdruk minder expansie dus luchtvolume blijft te klein; bij afnemende onderdruk meer expansie dus luchtvolume blijft groot.

2.4.4. Omdat de belgrootte onjuist is, kan de stijgsnelheid onjuist zijn.

2.4.5. Door punt 2.4.3 en 2.4.4 is het luchttransport in de hevel en daardoor onder andere de tijdsduur van aan- en afslaan niet juist.

2.4.6. De oppervlaktespanning is te groot in model. Over het effect hiervan op de grootte van het luchttransport en de afmetingen van de ontstane luchtbellen lopen de meningen uiteen; een model mag niet te klein zijn.

2.4.7. Onderzoek naar kavitatie en temperatuurwisselingen door drukverschillen zal in een model 1:1 of in een kleiner model geplaatst in een vakuümtank uitgevoerd moeten worden.

2.4.8. Door de drukvariatie kunnen als de hevel licht gekonstrueerd is, vooral in de knie trillingen ontstaan (zie [7]). In de meeste gevallen kan dit globaal berekend worden en zal onderzoek in een elastisch gelijkvormig model niet nodig zijn.

Enkele publikaties met betrekking tot de problematiek van het modelonderzoek zijn [12] en [13] .

3. Toepassing in delta-gebied

3.1. Keuze heveltype

Het in 2.1.1 genoemde voordeel van een hevel ten opzichte van een andere spuikonstruktie geldt in feite alleen voor een kroonhevel. Tussen de karakteristieke valpijp van de trechter-hevel en de uitlaat zal immers een diepliggende horizontale leiding gekonstrueerd moeten worden. In de bouwfase zullen daarom extra veiligheidsvoorzieningen moeten worden getroffen, omdat de hoofdwaterkering doorsneden wordt. Een ander nadeel kan zijn dat een obstakel als bijvoorbeeld een blokkendam met een spiraalhevel doorsneden moet worden.

Een kroonhevel kan in principe in twee richtingen, een spiraalhevel in één richting worden aangeslagen. Afhankelijk van de ontwerpeisen kan dat een voordeel of een nadeel zijn. Ter beperking van dit verslag wordt in het volgende alleen over kroonhevels gesproken.

Omdat een uitlaatwerk in het delta-gebied een kunstwerk is met betrekking tot de waterhuishouding zal onafhankelijk van de bovenwaterstand gespuid moeten kunnen worden. Omdat zelfaanslaande hevels alleen geschikt zijn voor waterstandsregeling moet een mechanisch aangeslagen hevel (zie 2.2.3) worden toegepast. Hierdoor wordt het mogelijk de hevel vrijwel onafhankelijk van het peil van het boven- of benedenwater te starten, zodra een zeker minimum benodigd verval aanwezig is.

Konstrukties waarbij de hevel door middel van een gestuurde afsluiter bij de hevel-knie (of in de baby-hevel) afgesloten kan worden zijn duur; een belangrijk voordeel van de hevel ten opzichte van andere spuikonstrukties verdwijnt (zie 2.1.4). Wel kan de hevelkruin zakken, indien de afsluiter in de hevel als stormvloedkering dienst kan doen. De instelbare schans die mechanisch wordt aangeslagen is minder aantrekkelijk omdat de hevel dan afhankelijk is van de bovenwaterstand. Toepassing van een vakuümpomp op de hevel-knie lijkt voor de hand liggend (zie 2.2.3). Een groot voordeel van een vakuümpomp is dat de hevelvorm minder kritisch is met betrekking tot het aanslaan en dat het minimum benodigd verval kleiner wordt.

Als men de hevel geheel met de vakuümpomp aanslaat (dit wil zeggen als men de bovenwaterstand tot kroonhoogte opzuigt), dan is het minimum benodigd verval bijzonder klein en kunnen bovendien allerlei voorzieningen

die de hevel sneller zelf doen aanslaan achterwege gelaten worden (schans, grote ontluchtingsschacht). Bij volledig aanslaan door een vakuümpomp zijn geen moeilijkheden door golfindringing te verwachten; het zelf aanslaan kan door golven namelijk bijzonder instabiel verlopen. In het volgende wordt uitgegaan van een mechanisch aangeslagen kroonhevel met vakuümpomp.

3.2. Keuze uitlaatkonstruktie

3.2.1. Algemeen

De konsekwentie van het aanslaan met een vakuümpomp is dat beide hevelbenen tijdens het aanslaan goed afgesloten moeten zijn. De inlaat moet hiertoe voldoende diep onder het bovenwater worden gebracht (geen lucht aanzuigen). Voor de uitlaat zijn meerdere konstruktievormen denkbaar (zie 2.2.4, 2.2.5 en 3.2.2).

3.2.2. Typen uitlaatkonstrukties

Het peil van het stortebed wordt in verband met de uitstroomkondities in het algemeen voldoende diep onder de benedenwaterstand gelegd, het peil van de uitlaatvloer kan, maar hoeft niet op hetzelfde niveau te worden gelegd. Het plafondpeil kan omhoog gebracht worden (tot boven de laagste benedenwaterstand, waarbij de hevel nog aangeslagen moet kunnen worden), mits maatregelen genomen worden om luchtinlaat via het onderbeen tegen te gaan. De konstruktiemethoden voor een verdronken uitlaat die bij een mechanisch aangeslagen kroonhevel met een vakuümpomp ter beschikking staan zijn: een stuw (of woelbak), of een waterslot (2.2.4 en fig. 3). (De zwanehalskonstruktie is een vrije uitlaat en is alleen bij zelfaanslaande hevels bruikbaar).

Stuw.

Naast beveiliging van de hevel tegen luchtinlaat via de uitlaatkonstruktie begrenst een stuw (of woelbak) ook het debiet. De laagste benedenwaterstand van de hevel wordt bepaald door het peil van de stuwkruin en de overstorthoogte. Het peil van de stuw en de uitlaat zal daarom berekend moeten worden uit het maximale gewenste debiet. Een en ander zal eveneens bekeken moeten worden met betrekking tot kavitatie. Bij hoge benedenwaterstanden biedt de stuw enigszins weerstand tegen de golfdoordringing.

De belasting op het uitlaatplafond (door golfklappen) wordt gereduceerd.

Bij lage benedenwaterstanden zal het water uit de hevel vrij over de stuw overstorten. Een woelbak aan de voet van de stuw kan dan noodzakelijk zijn (zie figuur 3). Indien de hevels over een voldoende afstand uit elkaar worden gelegd (geen gezamenlijke tussenwanden), heeft de stuw een sterk spreidende functie waardoor de uitstroomcondities aanzienlijk kunnen verbeteren. In feite is deze konstruktie een verdrongen uitlaat met een kaskade. Tussen stuw en hiel moet voldoende berging aanwezig zijn om de uitlaat na het afslaan onder water te houden.

Waterslot.

Bovenstaande konstruktie kan vereenvoudigd worden door het uit de uitlaat komende water direkt tot op het stortebed-niveau te laten neerstorten. De bij lage benedenwaterstanden vrijkomende uitlaat kan dan door middel van een waterslot afgesloten worden (zie figuur 3).

Een waterslot heeft ten opzichte van de stuw het nadeel van een sterkere golfdoordringing en golfbelasting op het uitlaatplafond. Een probleem is bovendien de bepaling van de benodigde berging in het slot. Na het aanzetten van de vakuümpomp stijgt het waterpeil in het onderbeen. Het slot moet funktioneren totdat de hevel aangeslagen is.

Bij het afslaan van de hevel mag het slot door de massatraagheid van het water niet leeglopen. Een oplossing is, de luchttoevoer bij het afslaan voldoende klein te houden (eventueel te programmeren).

Sterker nog dan bij de stuw geldt bij deze konstruktie het bezwaar van de(dure) voorzieningen die aan de voet van de uitlaat getroffen moeten worden om de bodemverdediging aan te passen aan het neerstortende water bij vol debiet (aangeslagen hevel en lage buitenwaterstanden).

3.2.3. Keuze uitlaatkonstruktie

Uit het bovenstaande blijkt wel dat bij vergelijking van de verschillende uitlaatkonstrukties enkele van de factoren die van belang zijn, in het kader van deze studie niet voldoende geëvalueerd kunnen worden.

Belangrijke factoren zijn:

- de toe te passen konstruktiemethode van de uitlaat;
- worden de hevels wel of niet tegen elkaar aangelegd (gezamenlijke tussenwanden, konsekwenties voor het toe te passen funderingstype);

- de relatie tussen de uitlaatkonstructie en de uitstroomkondities (onder andere kosten stortebed);
- het al of niet gewenst zijn van een debietbegrenzing (tevens een begrenzing van het luchtvolume) en
- de beschikbare ruimte; maximum beschikbare lengte en breedte van de hevel-batterij.

Als een globale indikatie kan gesteld worden dat bij beperkte hevel-breedte de stuw minder aantrekkelijk wordt (korte stuwlengthe, ongunstige uitstroomkonditie). Is de hevellengte beperkt, dan zal het waterslot vervallen door onvoldoende berging. Moet het debiet in absolute zin worden begrensd (bijvoorbeeld in verband met ontgronding) dan vervalt de vrije diepgelegen uitlaat.

De keuze van de uitlaatkonstructie zal per geval bekeken dienen te worden.

Om het aantal variabelen te beperken is in het vervolg van dit hoofdstuk uitgegaan van een vrije diepgelegen uitlaat.

3.2.4. Plafondpeil vrije diepgelegen uitlaat

Er zijn twee uitgangspunten mogelijk bij het bepalen van het peil van het uitlaatplafond.

1. Als wordt gesteld dat de hevel wel "altijd" gebruikt maar niet "altijd" gestart moet kunnen worden en dat in het algemeen bij afgaand water gestart zal worden zodra voldoende verval aanwezig is, dan kan het uitlaatplafond op een niveau gelegd worden gelijk aan de laagste benedenwaterstand waarbij de hevel nog gestart moet kunnen worden minus een maatgevende golfhoogte.
2. Als ervan wordt uitgegaan dat de hevel "altijd" gebruikt en aangeslagen moet kunnen worden, dan zijn voor het plafondpeil de laagst voorkomende benedenwaterstanden en bijbehorende golfhoogten maatgevend.

Als het eerste uitgangspunt gehanteerd wordt kan de hevel bij grote vervallen niet aangeslagen worden.

Het tweede uitgangspunt leidt echter tot aanzienlijk lager gelegen konstruktiepeilen.

Met behulp van het eerste of het tweede uitgangspunt kan het optimale plafondpeil worden bepaald. Bij een aantal lage waterstanden (uit een

onderschrijdingslijn), waarbij de hevel nog aangeslagen kan worden, kunnen overschrijdingslijnen van zeegolven verzameld worden.

Hiermee zal dan afhankelijk van de geaccepteerde kans (bijvoorbeeld 10^{-4}) dat de hevel niet kan worden aangeslagen, het plafondpeil berekend kunnen worden.

Is de hevel aangeslagen dan zal, door het grote heveldebiet, bij lagere waterstanden geen luchtlekkage naar de knie ontstaan. Een argument voor een laaggelegen plafond vormt de golfbelasting; bij een laag plafond treden golfklappen tegen het plafond bij lagere waterstanden op, de korresponderende golfhoogten zijn daarbij kleiner.

3.2.5. Hoogte vrije uitlaat

De maximale ter beschikking staande hoogte hangt samen met de keuze van het stortebed.

De relatie tussen stortebed en de mogelijke vormgeving van de uitlaatkonstruktie zal op dezelfde manier als bij een duikersluis gebruikelijk is bepaald moeten worden. Een en ander is in het kader van deze studie niet verder uitgewerkt.

3.2.6. Peil plafond tussen hiel en uitlaat

Het hevelgedeelte tussen hiel en uitlaatkonstruktie zal enerzijds zo hoog mogelijk gekonstrueerd worden in verband met een besparing op de aanlegkosten, anderzijds is die hoogte begrensd omdat het luchtvolume niet onevenredig sterk mag toenemen bij lage buitenwaterstanden en afgeslagen hevel. Hierdoor zou een veel te grote vakuümpompcapaciteit nodig zijn.

Als we ervan uitgaan dat de waterstand niet onder het plafond van het hevelgedeelte tussen hiel en uitlaat mag dalen, voor die waterstanden waarbij de hevel nog aangeslagen kan worden, dan volgt het plafondpeil uit het gestelde in 3.2.4.

In feite moet de hiel hieraan voldoen en mag het plafondpeil tussen hiel en uitlaat hoger gelegd worden. Wordt dit gedaan dan ontstaat echter een ongunstige situatie: gedeeltelijk gevulde koker, sterke golfindringing, vrij groot waterslot onder de hiel nodig, ontluchtingsschacht(en) gewenst. Zolang het plafondpeil hoger ligt dan het uitlaatplafond is een ontluchtingsschacht wenselijk, tenzij wordt geaccepteerd dat alle luchttransport bij het aanslaan door de vakuümpomp wordt verricht (totdat de hevel zelf aanslaat).

Bij het ontwerp (figuur 19) is hiervan uitgegaan.

Een hoge ligging van het hevelgedeelte tussen hiel en uitlaat kan aanleiding geven tot luchtophoping voor de uitlaat (groot verschil in plafondpeil). Bovendien worden de drukken dan erg laag bij aangeslagen hevel, zodat ook bij dit hevelgedeelte extra aandacht aan de luchtdichtheid geschonken moet worden.

3.2.7. Ontluchtingsschacht

Door een diepe ligging van de hiel ten opzichte van de waterstand in het onderbeen zal een hevel tijdens het mechanisch aanslaan niet gemakkelijk zelf lucht gaan meenemen. Hierdoor ontstaat een langduriger procedure van aanslaan en een benodigde grotere vakuümpompkapaciteit. Leggen we de hiel en het hevelgedeelte tussen hiel en uitlaat iets hoger dan zal de relatief diepgelegen vrije uitlaat de afvoer van lucht belemmeren. Dit is te verbeteren door toepassing van een ontluchtingsschacht vlak achter de hiel.

De vormgeving en het effect van de schacht zullen in model onderzocht moeten worden. De plaats van de schacht en de benodigde diameter moeten zo gekozen worden dat de eigen slingertijd van de schacht plus de rest van het systeem buiten de gangbare golfperioden ligt.

3.3. Inlaatkonstruktie

Door een goede vormgeving van de inlaatkonstruktie kan turbulentie (kavitatie) beperkt worden.

De ligging van het plafond moet zo gekozen worden dat geen lucht-aanzuiging plaatsvindt.

Analoog aan 3.2.4 kan de plafondhoogte van de inlaat bepaald worden. Uit een onderschrijdingslijn van lage stuwpeilen (inklusief de variatie daarop onder andere door afwaaiing) en bijbehorende frekwentieverdelingen van golfhoogten, kan een onderschrijdingslijn van lage bovenwaterstanden bepaald worden. In tegenstelling tot bij de uitlaat, moet bij de inlaat met de snelheidshoogte rekening worden gehouden (lucht aanzuigen).

Om de kans te berekenen dat een bepaald debiet bij een bepaalde bovenwaterstand voorkomt moet de relatie tussen boven- en benedenwaterstand bekend zijn. Deze relatie is statistisch gekoppeld hetgeen de berekening gekompliceerd maakt.

Ter vereenvoudiging kan uit de vastgestelde onderschrijdingslijn de maatgevende bovenwaterstand (y_b) genomen worden. Hoever het inlaatplafond daaronder gelegd moet worden hangt af van de intree-snelheden en dus onder andere van de inlaathoogte. Uitgaande van een zo hoog mogelijk vloerpeil van de inlaat kan een eerste schatting van plafondpeil en inlaathoogte gedaan worden.

Uit een recentelijk onderzoek in overeenkomstige situaties (zonder golven) is gebleken dat de grens waarbij lucht aanzuigen niet meer voorkomt wordt bereikt als het inlaatplafond $1,3 \text{ à } 1,5 \times \frac{\bar{v}^2}{2g}$ meter onder de bovenwaterstand wordt gelegd, waarbij $\bar{v}$ de gemiddelde intree-snelheid is. Genoemde bedragen zijn afhankelijk van de symmetrie van de instroomcondities en kunnen slechts bereikt worden bij een optimale vormgeving van de inlaatopening.

Als beveiliging tegen luchtaanzuigen rekenen we met een faktor C' keer de snelheidshoogte. Indien de hevelinlaat niet konvergeert in de breedte (naast elkaar liggende hevels), dan geldt $\bar{v} = q/h$ als h de hoogte van de inlaat is.

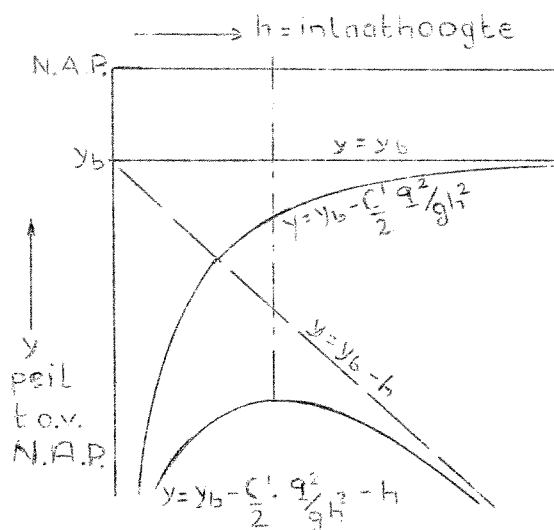
Leggen we het plafond op $y = y_b - \frac{C'q^2}{2gh^2}$ (waarin y_b de maatgevende bovenwaterstand inclusief golven en afwaaiing is) en dus de inlaatvloer op $y = y_b - \frac{C'q^2}{2gh^2} - h$, dan volgt het minimaal benodigde vloerpeil uit $\frac{\partial y}{\partial h} = 0$:

$$h = \sqrt[3]{C'q^2/g}$$

De Bernoulli-term $\frac{\bar{v}^2}{2g} = h/2C'$

Het plafond komt op $y = y_b - \frac{1}{2}h$,

de vloer op $y = y_b - 1,5 h$



Deze berekening geldt eveneens voor in de breedte konvergerende inlaten, alleen moet dan de q naar verhouding worden aangepast.

Bovenstaande aanpak leidt echter tot vrij nauwe inlaten met hoge stroomsnelheden en veel weerstand. In verband met de hierdoor benodigde duurdere bodemverdediging en de onnodig grote intree-verliezen, zal een grotere inlaathoogte gekozen worden.

Het plafondpeil kan op $y = y_b - C' \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g}$ gelegd worden. De C' waarde is sterk afhankelijk van de inlaatvorm. De waarde van C' en de juiste vormgeving zullen middels modelonderzoek vastgesteld moeten worden.

De plafondhoogte kan verlaagd moeten worden indien ter voorkoming van zeewater-indringing de hevelknie onder overdruk gezet wordt.

Het plafond van de koker tussen inlaat en bovenbeen, kan op de laagste bovenwaterstand worden gelegd (zonder met golven rekening te houden) indien de afstand tussen inlaat en bovenbeen voldoende groot is (demping van golfdrukken).

Als de hevel slechts in één richting wordt gebruikt verdient het aanbeveling de inlaat wijder te maken, om de weerstand bovenstrooms te verminderen en de drukken in de hevelknie te verhogen.

Bij de inlaat moeten voorzieningen getroffen worden om vooral drijvend grof vuil te weren.

3.4. Hevelknie

Het peil van de kruinhoogte wordt door drie aspecten begrensd.

Een lage kruin geeft hoge drukken in de knie waardoor de kans op kavitatie vermindert. Een hoge kruin voorkomt zeewater-indringing (zonder dat extra afsluitmechanismen nodig zijn).

Een grotere kruinhoogte vergroot zowel de opvoerhoogte als de benodigde capaciteit (luchtvolume) van de vakuümpomp.

De relaties tussen de kruinhoogte en achtereenvolgens de zeewater-indringing, de drukverdeling en de vakuümpompkapaciteit worden in respectievelijk hoofdstuk 3.11, 3.9 en 3.13 van deze nota verder uitgewerkt.

Het kroonpeil moet zo hoog mogelijk zijn om voldoende kniehoogte te verkrijgen en zo laag mogelijk om de kans op kavitatie te verminderen. Het bepalen van het kroonpeil zal in sterke mate afhankelijk zijn van constructie- en exploitatiekosten omdat de kniehoogte (en -breedte) via kostenminimalisering bepaald zullen worden.

Kniehoopte en breedte worden immers mede bepaald door het gewenste af te voeren debiet, het aantal hevels, de beschikbare ruimte, de mate waarin het debiet fijn-geregeld moet worden en de vakuüminstallatie.

De mogelijke ligging van de hevelknie (van vlak achter de inlaat tot vlak voor de uitlaat) is afhankelijk van factoren als: configuratie dam, ligging wegen, gewenste plaats van het pompenhuis (met de vakuüminstallatie en de ontluchtingsschachten) en de plaats van obstakels (blokkendam). Andere factoren zijn:

- a. de drukverhoging (zonder golven) die mogelijk is door de hevelknie aan de bovenwaterzijde te leggen (ligging energielijn),
- b. het uitdempen van de waterstandfluctuaties (ten gevolge van golven op het benedenwater) in het onderbeen van de afgeslagen hevel waardoor de zee-water-indringing (door golven) vermindert als de hevelknie aan de bovenwaterzijde wordt gelegd en
- c. de golfinvloed op de druk in de aangeslagen hevel is lineair met de plaats tussen boven- en benedenwater, zie vergelijking (32) in hoofdstuk 3.12.

Indien de golven op het benedenwater groter kunnen worden dan op het bovenwater pleit ook faktor c voor een ligging van de hevelknie nabij de inlaat.

Bij gebruik van de hevel in twee richtingen behoeft de knie niet zonder meer in het hevel midden gelegd te worden. De waterstanden aan weerszijden van de hevel zullen immers in het algemeen verschillende karakteristieke waarden hebben.

Voor een in één richting te gebruiken hevel is in hoofdstuk 3.8 de relatie tussen de plaats van de hevelknie en de druk verder uitgewerkt.

Indien men het binnendringen van zeewater voorkomen wil door het instellen van een overdruk in de hevelknie kan het kniepeil belangrijk verlaagd worden.

3.5. Vormgeving diverse onderdelen

Enkele aspecten die in verband met de vormgeving een rol spelen zijn:

- a. turbulentie en energieverliezen, niet alleen vanwege het debiet, . .
maar turbulentie vergroot de kans op kavitatie,
- b. snelheidsverloop; dit bepaalt mede de ligging van de energielijn,
het piëzometrisch niveau en dus het drukverloop,
- c. in- en uittreesnelheden, in verband met luchtaanzuigen en bodem-
bescherming,
- d. luchttransport en -volume, in verband met de snelheid waarmee de
hevel zelf aanslaat (zie 3.6, 3.12 en 3.13); wordt de hevel geheel
mechanisch aangeslagen dan speelt het luchttransport geen rol,
- e. weerstand, afvoer,
- f. kavitatie,
- g. instabiliteiten (2.3.16),
- h. luchttopeenhoping bijvoorbeeld in de kroon of daar waar het hevel-
plafond omlaag buigt naar het peil van het uitlaatplafond,
- i. plaats van luchtinlaat en vakuümpompaansluiting.

ad. a. Goede vormgeving van de inlaatkonstruktie (ook gewenst in
verband met luchtaanzuigen); vloeiende overgangen naar ver-
schillende doorsneden; geen sponningen in de inlaatzijde
(stormvloedkering).

ad. b. Het drukverloop kan onder andere beïnvloed worden door:

1. abrupte uitstroming (nadeel in verband met ontgronding).

Geen divergerende uitlaat toepassen,

2. vloeiende uitstroming (reduktie uitstroomverliezen en
verlaging energielijn geeft eerder kavitatie).

Bij mogelijkheid 2 kan de in- en uitlaatkonstruktie
eventueel aan elkaar gelijk gemaakt worden, hetgeen be-
langrijk kan zijn met betrekking tot bouwkosten en gebruik
van de hevel als inlaatwerk.

Indien de hevelknie vlak achter de inlaat en ver van de
uitlaat wordt gelegd, wordt de druk in de hevelknie nau-
welijks door de vormgeving van de uitlaat meer beïnvloed.

ad. c. Een inlaat die konvergeert of een uitlaat die divergeert in de breedte (bodembescherming) veroorzaakt wel dat de afzonderlijke hevels van de hevelbatterij van elkaar af komen te liggen. Dit impliceert enerzijds dat er geen gemeenschappelijke tussenwanden kunnen zijn, anderzijds kan dit funderingstechnisch voordelen bieden.

Met behulp van een kostenvergelijking zal de heveldoorsnede bepaald moeten worden (zie ook 3.4). In vele opzichten zal een groot aantal lage platte hevels het meest gunstig zijn. Het divergeren van in- en uitlaat is dan wellicht niet nodig.

ad. d. De gebruikelijke methode om de plafonds van de horizontale leiding achter de hiel naar de uitlaat toe iets te laten oplopen om gemakkelijker lucht uit de hevel kwijt te raken, gaat niet op bij een diepliggende uitlaat; er is dan een ontluchtingsschacht nodig; de vormgeving van knie en aansluitingen van de luchtinlaat en de vakuümpomp en de plaats van de aansluiting in de hevelknie zijn belangrijk om luchttoename te verminderen en kans op instabiliteiten te verkleinen. Wordt de hevel geheel mechanisch aangeslagen, met andere woorden wordt het bovenwater met de vakuümpomp tot kroonhoogte opgetild voordat de hevel aanslaat, dan is de vormgeving minder kritisch dan bij geheel of gedeeltelijk zelfaanslaande hevels, zie verder 3.6.

ad. f. Het is van belang de knie vlak achter de inlaat te zetten, een wijde inlaat, een ruim bovenbeen en een gladde afwerking van de hevelknie (geen wandkavitatie; zie 3.12) toe te passen waardoor de totale weerstand van de hevel grotendeels achter de hevelknie ligt. Een gladde kniewand verkleint de kans op kavitatie.

Vormgeving - details zullen met behulp van modelonderzoek verder uitgewerkt kunnen en moeten worden (2.4).

3.6. Aanslaan, afslaan

Het afslaan kan bereikt worden door het inlaten van lucht in de knie (bijvoorbeeld via de vakuümpompafvoer). Dit kan geautomatiseerd worden op de over- en onderschrijding van een bepaald verval (zie verder 3.14).

Het aanslaan gebeurt in fasen. Eerst rijst het water in het bovenbeen door het instellen van een onderdruk door de vakuümpomp. Zodra het water boven de kruin stijgt ontstaat een overstort. Het debiet is als een overlaat te berekenen. Bij het verder stijgen van het overstort-niveau vergroot de luchttransportkapaciteit van het water. Op een bepaald moment kan de vakuümpomp gestopt worden waarna de hevel zichzelf aanslaat. De bijbehorende waterstand en de snelheid van het zelf aanslaan zijn sterk afhankelijk van de vormgeving van de hevel. Bovendien zal het luchttransporterend vermogen verbeterd kunnen worden door toepassing van een ontluchtingsschacht achter de hiel. (De grote leidinglengte tussen onderbeen en uitlaat bemoeilijkt-, de diepe ligging van de uitlaat verhindert de luchtafvoer.

Belangrijke aspecten met betrekking tot het aanslaan zijn:

1. Benodigde pompkapaciteit (en gewenste tijd) om de bovenwaterstand zo hoog boven de kruin te tillen dat de hevel zelf zal aanslaan.
2. De waterhoogte boven de kruin op het moment van verder zelf-aanslaan.
3. De snelheid waarmee de afvoer van "een overstort" overgaat in de "gesloten leiding afvoer".
4. Het minimum benodigde verval om de hevel te kunnen aanslaan.
5. De totale tijd van aanslaan (1 en 3).

ad. 1. Vakuüminstallatie

De te installeren pompkapaciteit om de bovenwaterstand in een bepaalde tijd tot een bepaalde hoogte op te tillen wordt berekend in 3.13.

In de berekening wordt geen rekening gehouden met luchtlekkages. Het is hiertoe onder andere van belang de lekkages via de wanden te beperken door de gedeelten van de hevel waar regelmatig een onderdruk heerst zo goed mogelijk luchtdicht uit te voeren.

Ook wordt niet gerekend met de mogelijkheid, dat de hevel gedempt kan worden afgeslagen, als men weet dat bij het volgende getij weer gespuid moet worden. Bij het gedempt afslaan wordt een onderdruk in de hevelknie gehandhaafd waarbij het benedenwater juist onder de hevelknie blijft.

De berekening van 3.13 is opgezet voor één pomp en één hevel.

De keuze van de te installeren pompkapaciteit wordt voorts bepaald door het systeem dat gekozen wordt om de gehele hevelbatterij in werking te stellen.

Mogelijkheden zijn:

- a. één vakuümpomp voor de gehele batterij,
- b. één vakuümpomp per hevel,
- c. tussenoplossing.

ad. a. Hierbij kan de pompkapaciteit variëren van K tot $a_1 \times K$ (K is pompkapaciteit per hevel, terwijl de batterij uit a_1 hevels bestaat).

Wordt K geïnstalleerd dan kunnen de hevels alleen na elkaar worden gestart (langdurig) tenzij de ene hevel de andere start: Wellicht is het interessant gebruik te maken van het luchttransporterend vermogen van de éne aangeslagen hevel om de volgende te starten. Wordt $a_1 \times K$ geïnstalleerd dan is er een grote overkapaciteit indien slechts een enkele hevel gestart behoeft te worden.

Bij gebruik van de spui-inrichting zullen de hevels tijdens ieder (gemiddeld) getij aangeslagen en afgeslagen moeten worden. Dit vraagt om een vrij grote capaciteit van de vakuüminstallatie en een goede automatisering.

Mogelijkheden tot automatiseren zijn bijvoorbeeld:

aanslaan pomp ($|\Delta H| > \delta$ en $\frac{d}{dt} (\Delta H) > 0$),
stoppen pomp zodra hevel zelf aanslaat (op waterstand),
afslaan hevel ($|\Delta H| > \text{maatgevend verval}$),
afslaan hevel ($|\Delta H| < \delta$ en $\frac{d}{dt} (\Delta H) < 0$).

ad. b. Indien in de hierboven omschreven oplossing de pompen te groot worden kan gedacht worden aan een systeem waarbij de vakuümpompen centraal in één pompenruimte kunnen worden ondergebracht. Er kan een flexibel systeem worden geïnstalleerd om de verbinding tussen hevels en pompen te kunnen omschakelen.

Het te kiezen systeem en het te installeren vermogen is naast de gewenste snelheid van aanslaan vooral een economisch probleem.

ad. 2. Minimum waterstand boven de kruin

Modelonderzoek geeft een vrij nauwkeurige voorspelling van de benodigde waterstand (h_z) boven de kruin, waarbij de hevel zal gaan aanslaan (punt A in grafiek bij 3.6 ad. 4) zie ook [13] en [14].

Een schatting naar h_z kan worden gedaan door te veronderstellen dat de gemiddelde snelheid dan groter moet zijn dan de maximale stijgsnelheid van de luchtbelllen ($\hat{v}_b$).

Met andere woorden

$$\hat{v}_b < Q/F = \frac{\alpha \cdot h_z^{3/2}}{h \text{ onderbeen}}$$

Als $\alpha \approx 2$ en $\hat{v}_b \approx 0,3 \text{ m/s}$ dan geldt

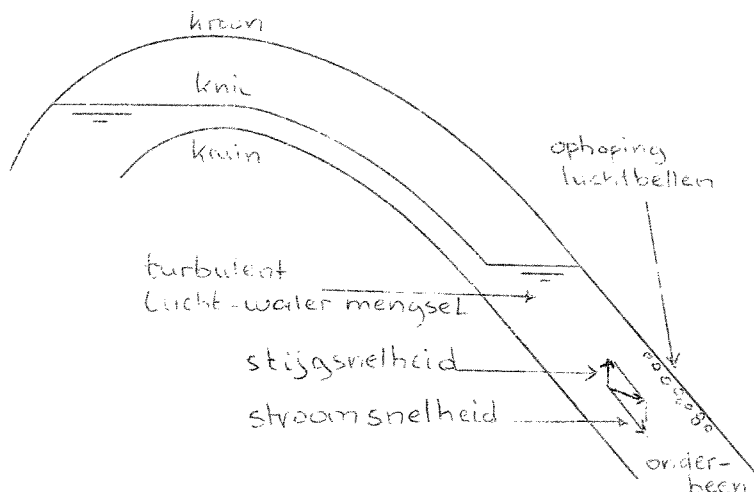
$$h_z > 0,3 (h \text{ onderbeen})^{2/3}$$

Stijgsnelheid luchtbelllen

Bij toenemende snelheid vervormen gasbelllen in een vloeistof en krijgen bij benadering een ellipsoïde-vorm. Wordt de snelheid nog groter dan ontstaan vorm-instabiliteiten (asymmetrische belllen) en zal de bel breken. Kleine belllen hebben een kleinere stijgsnelheid (hogere C_D waarde) dan grote belllen. Aan de hand van de gegevens van D.W. Moore [20] kan worden afgeleid dat de maximale stijgsnelheid van lucht in water bij benadering 0.3 m/s is.

Helling onderbeen

Het niet vertikaal zijn van het onderbeen heeft een aantal konsekventies. Ten eerste is de stroomrichting niet meerevenwijdig aan de stijgsnelheidskomponent, de belllen zullen bij de wand opeenhopen.



Bovendien zal een sterk asymmetrisch stroombeeld in het onderbeen ontstaan met minimale omlaag gerichte snelheidskomponenten daar waar zich de meeste luchtbelllen bevinden.

Een en ander heeft tot gevolg dat de benodigde waterstand boven de kruin om de hevel te kunnen aanslaan

en het benodigde verval om de hevel aangeslagen te houden aanzienlijk groter kan zijn dan het hiervoor berekende.

Om de hevel snel te kunnen aanslaan lijkt het wenselijk het onderbeen zo steil mogelijk te konstrueren en/of bijvoorbeeld middels een schanskonstruktie de hoofdstroom langs die plaats te geleiden, waar een opeenhoping van luchtbellens te verwachten is.

Bij grote afstanden tussen waterstand in het onderbeen en de hiel heeft een vertikaal onderbeen de voorkeur. Is de afstand zo groot dat de snelheid over de doorsnede ongeveer konstant is, dan zal het nog lager konstrueren van de hiel geen invloed meer hebben op luchttransportkapaciteit. De dalende bellens verkleinen door oplopende druk, waardoor hun stijgsnelheidskomponent afneemt.

Indien tijdens het aanslaan de waterstand in de hevelbenen fluktueert door korte golven dan zal vooral bij kleinere vervallen het (overstort-) debiet sterk variëren.

Door het wisselend debiet en de variërende waterstand boven de knie zal het aanslaan erg instabiel zijn.

Dit kan verbeterd worden door bijvoorbeeld de hevel bij enigszins grotere vervallen aan te slaan en een golfdempende konstruktie voor de inlaat te plaatsen (zie ook [14]).

ad. 3. Snelheid van aanslaan

Een indicatie voor de snelheid waarmee het heveldebiet volgens een volkomen overlaat karakteristiek overgaat in een gesloten leiding karakteristiek is de helling van de lijn tussen de punten A en B van de grafiek in 3.6 ad 4.

Als de hevel snel aanslaat zal dit lijngedeelte vrijwel horizontaal lopen. Door beluchten kan de snelheid van aanslaan afgeremd worden [14] .

Tussen A en B kunnen stationaire afvoerkondities bestaan [13] . Als lucht wordt getransporteerd neemt de druk bij de kroon af. Het luchttransporterend vermogen (in kg lucht per seconde) neemt af. De stijging van de waterstand boven de kruin wordt steeds minder en stopt. Kleine variaties in de benedenwaterstand hebben hierop geen invloed.

De ligging van de lijn A-B kan naarmate men dichterbij B komt, met modelonderzoek steeds minder nauwkeurig voorspeld worden [14] .

Uit proeven met verschillende modelschalen [13] bleek toch een redelijke schatting van de plaats van punt B gemaakt te kunnen worden.

ad. 4. Minimum benodigd verval

Om een eerste schatting te doen naar het minimum benodigde verval waarbij de hevel aan zal kunnen slaan wordt gebruik gemaakt van het feit dat de stijgsnelheid van luchtbellen begrensd is (zie 3.6 ad. 2 stijgsnelheid luchtbellen).

Bij een diepliggende hiel zal het benodigde verval om de hevel te kunnen aanslaan, het verval zijn, waarbij de snelheden zo groot zijn, dat de eenmaal gevormde luchtbellen door de stroom meegenomen zullen worden. (Bij een ondiepe hiel zal dit anders zijn in verband met het dynamische gedrag van het lucht-water mengsel direkt na de menging).

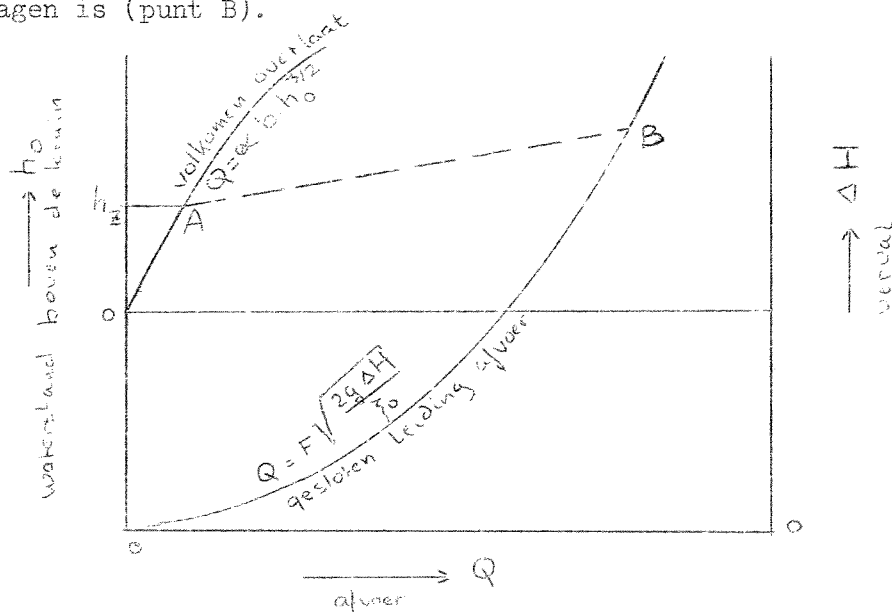
Indien (tussen het menggebied en de hiel) de hoeveelheid meegenomen lucht gering is (langzaam aanslaan) kan het blokkerende effect van de luchtbellen in het onderbeen verwaarloosd worden. Daarentegen wordt bij grote hoeveelheden luchtbellen (in een kwasi-permanente situatie) de weerstand in het onderbeen groter.

De debieten en dus de gemiddelde snelheden zullen hierdoor afnemen. Het luchttransport zal kleiner worden.

Uitgaande van een diepliggende hiel, een gering luchttransport en een vertikaal onderbeen kan gesteld worden dat

het minimum benodigd verval $> \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{g}$. (maximaal stijgsnelheid)².

Bovenstaande geldt voor het moment waarop de hevel juist aangeslagen is (punt B).



Bij een maximale stijgsnelheid van 0.3 m/s zou $\Delta H_{\min}$ orde 1 cm zijn. Hieruit blijkt wel dat als de hevel eenmaal aangeslagen is (punt B) een gering verval voldoende is om nog lucht af te kunnen voeren. Wel zal bij gering verval de overlaatkonditie snel verdronken zijn.

Een andere aanpak is daarom te stellen, dat het verval zo groot moet zijn dat de afvoer op het moment van aanslaan nog juist volkomen is, indien men van het zelf-aanslaand vermogen van de hevel gebruik wil maken. Daarmee is het debiet immers maximaal bij een bepaalde waterstand boven de kruin (voor het aanslaan), en zal de tijd van aanslaan beperkt blijven.

Als de hevel niet te hoog is, de hevelkonstruktie voldoende luchtdicht is en de vakuümpomp voldoende capaciteit heeft zal het minimum benodigd verval niet groot zijn.

Wil men het benodigd verval zo klein mogelijk houden, dan zal alle lucht door de vakuümpomp afgevoerd moeten worden, er behoeft dan nauwelijks een debiet te zijn, volkomen overlaatkondities zijn niet nodig, de vormgeving is **minder kritisch** en konstrukties als schans en ont- luchtingsschacht zijn minder zinvol.

ad. 5. De totale tijd van aanslaan

Afhankelijk van pompkapaciteit (ad 1), de benodigde waterhoogte boven de kruin (ad 2) en de snelheid waarmee de overlaatafvoer overgaat in gesloten leidingafvoer (ad 3) kan de totale tijd van aanslaan bepaald worden. Bovendien moet gewacht worden tot het benodigde minimum verval aanwezig is.

Verwacht wordt dat deze totale tijd niet juist door een te klein model gereproduceerd wordt (2.4.5), soms worden echter toch goede resultaten bereikt [19] en [13].

Relevante aspecten zijn voorts: luchtdichtheid, golfinvloed, gedempt afslaan.

De pomp kan gestart worden voordat het benodigde minimum verval aanwezig is, zodanig dat juist geen water over de kruin loopt.

Met baby-hevel, schans en ontluchtingsschacht is het zelf-aanslaan te bevorderen.

3.7. Debiet in aangeslagen toestand

Voor een eenparige beweging in hydraulisch ruwe situaties is met behulp van de formule ($C = 5,75 \sqrt{g} \log \frac{12 R_h}{k}$) voor een leiding een weerstandskoefficiënt af te schatten, indien de wandruwheid (k) en de hydraulische straal R_h bekend zijn. De berekening is uitgevoerd in figuur 6.

Per definitie kan voor het verval geschreven worden

$$\Delta H = \sum_0 \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (1)$$

De hiermee vastgelegde relatie tussen $\sum_0$ en het debiet is in figuur 7 weergegeven.

De totale verlieskoefficiënt kan opgebouwd gedacht worden uit intree-, wrijvings-, bocht- en uittree-verliezen:

$$\sum_0 = \sum_i + \sum_w + \sum_b + \sum_u$$

Als een eerste ruwe schatting kan bijvoorbeeld genomen worden:

$$\sum_i \approx 0, \quad \sum_w = \lambda \cdot \frac{1}{4R_h}, \quad \sum_b \approx 0,2 \text{ en } \sum_u \approx 1;$$

nu kan (1) geschreven worden als:

$$\Delta H = \left\{ \lambda \cdot \frac{1}{4R_h} + 1,2 \right\} \bar{v}^2 / 2g \quad (2)$$

Hiermee is ruwweg de relatie tussen de hydraulische straal en het debiet gekarakteriseerd (zie figuur 8). Om de gedachten te bepalen kan de term $\frac{\lambda \cdot 1}{4R_n}$ als volgt worden afgeschat; voor $k = 2 \cdot 10^{-3}$ m (afgewerkt beton) en $R_h = 1,2$ m is $C = 70 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$ (zie figuur 6) dus $\lambda = 0,016$ ($\lambda = 8g/C^2$); voor $l = 300$ m is $\frac{\lambda \cdot 1}{4R_n} \approx 1$ dus $\gamma_0 = 2,2$.

Een nauwkeuriger schatting van een aantal γ -waarden wordt in [9] gegeven, de beste benadering van de afvoercoëfficiënt wordt evenwel door modelonderzoek verkregen (zie onder andere [10] en [11]).

3.8. Drukverdeling in de hevelknie

In een aangeslagen hevel kan de drukverdeling in de hevelknie (bij permanente stroming) als volgt berekend worden:

$$\text{Het debiet} \quad Q = b \int_{R_1}^{R_2} v dR \quad (3)$$

Substitueren we $v \cdot R = K$ (=konstant) hierin (sterk vereenvoudigde aanname van gekromde potentiaal stroming).

$$\text{dan is} \quad Q = K \cdot b \ln(R_2/R_1) \text{ of} \quad (5)$$

$$q = K \cdot \ln(R_2/R_1)$$

$$\text{uit } v \times R = K \text{ volgt: } v = \frac{q}{R \ln(R_2/R_1)} \quad (6)$$

Hiermee is de snelheidsverdeling over de vertikaal in de hevelknie te berekenen. Omdat $q = \bar{v} (R_2 - R_1)$, kan vergelijking (6) geschreven worden als:

$$\frac{v}{\bar{v}} = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \times \frac{R_1}{R} \quad (7)$$

Het verband tussen $\frac{v}{\bar{v}}$ en $\frac{R}{R_1}$ is in figuur 9 uitgezet.

De maximale en minimale snelheden worden gevonden door voor R in vergelijking (7) de kruinstraal R_1 respectievelijk de kroonstraal R_2 in te vullen.

Als de snelheden v_1 en v_2 bekend zijn kunnen met de vergelijking van Bernoulli (10) de drukken p_1 en p_2 uitgerekend worden; de energiehogte kan met (14) worden bepaald:

$$\frac{p_{1,2}}{\rho g} = y_b - y_{1,2} - \frac{\bar{v}^2}{2g} \left[\frac{\lambda l''}{4R_h} + \zeta_i + \frac{\zeta_b}{2} + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_{1,2} \ln R_2/R_1} \right)^2 \right] \quad (8)$$

(voor definities zie figuur 1).

Omdat er met betrekking tot kavitatie-inceptiegetallen (zie ook 3.12) onvoldoende gegevens beschikbaar zijn kan de kans op kavitatie niet worden afgeschat. Wel kan gesteld worden dat een zo hoog mogelijke druk in de hevelknie de kans op kavitatie doet afnemen. Derhalve wordt voorlopig volstaan met het onderzoeken van variabelen die van invloed zijn op de druk in de hevelknie. Omdat in vergelijking (8) voor $\bar{v}^2/2g$ eveneens $\Delta H/\zeta_0$ gelezen kan worden, kan uit (8) worden afgelezen dat de volgende maatregelen een drukverhoging in de hevelknie zullen bewerkstelligen:

- a. verlagen van kruin- en kroonpeil ($y_1, y_2 \leftrightarrow p_1, p_2$ zie figuur 10),
- b. verlagen kniehoogte ($y_2 - y_1 \leftrightarrow p$ zie figuur 11),
- c. verkleinen van het maatgevend verval ($\Delta H \leftrightarrow p$ zie figuur 12),
- d. verhogen van de weerstand ($\zeta_0 \leftrightarrow p$ zie figuur 12),
- e. knie dicht bij inlaat ($l'' \leftrightarrow p$ zie figuur 13),
- f. wijde inlaat en ruime bochten bij bovenbeen
 $(\zeta_i + \frac{\zeta_b}{2} \leftrightarrow p$ zie figuur 12).

Bij deze met betrekking tot kavitatie gunstige maatregelen zijn de volgende nevenaspecten van belang:

- ad. a. Vergroting zeewaterindringing (zie 3.11);
 verlaging pompkapaciteit (zie 3.13);
 zie ook 3.4.
- ad. b. Lage brede hevels geven gunstiger uitstroomcondities maar vergen veel ruimte.

- ad. c,d. Debietbeperkend, waardoor het aantal benodigde hevels zal toenemen.
- ad. e. Zeewaterindringing neemt af (zie 3.11).
 Golfdrukken nemen af indien de golven op het benedenwater groter zijn dan op het bovenwater. Indien obstakels (bijvoorbeeld blokkendam) vermeden moeten worden, kan dat de plaats van de knie beïnvloeden. De golven op het bovenwater worden minder gedempt als de knie vlak achter de inlaat ligt (zie 3:4).
- ad. f. Golfinvloed vanaf bovenwater neemt toe; zie ook 3.3.

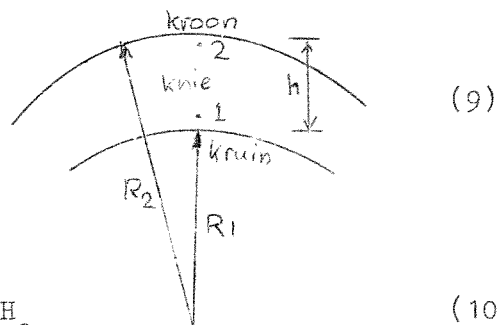
In de bovenstaande formules is de invloed van golven op de druk in de hevelknie niet opgenomen, in hoofdstuk 3.10 zal dit aspect nader uitgewerkt worden.

3.9. Afrondingstraal van de kruin

Het is gebruikelijk de straal van de kruin te berekenen met behulp van het criterium dat de druk bij kruin en kroon gelijk moet zijn. Een argument hiervoor is dat het oplossen van lucht dan gelijkmatig over de doorsnede zal plaatsvinden, waardoor de luchttransportkapaciteit toeneemt [14]. Een goede verdeelde luchtoplossing versnelt het zelf aanslaan van een hevel. Omdat luchttransportkapaciteit voor aangeslagen hevels onder groot verval minder belangrijk kan zijn lijkt in dit geval eveneens een aannemelijk criterium om het getal van Thoma (kavitatie-getal) konstant over de kniehoogte te houden. Hierdoor wordt er wellicht voor gezorgd dat geen al te lage kavitatie getallen voorkomen (gelijke veiligheid tegen kavitatie). In dit hoofdstuk worden beide criteria uitgewerkt en met elkaar vergeleken.

- A. Gelijke drukken: $p_1 = p_2$
 Volgens Bernoulli geldt dat

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + y_2 = H_e \quad (10)$$



Omdat $y_2 - y_1 = h$ kan (10) na substitutie van (9) geschreven worden als

$$h = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (11)$$

Dit is ook als volgt af te leiden:

$$p_{n_1} = p_{n_2} + \int_1^2 \frac{v^2}{gR} dR \quad \text{of} \quad h = \int_2^1 \frac{v^2}{gR} dR \quad (12)$$

(pn = piëzometrisch niveau)

Voor een potentiaalstroom geldt $v \cdot R = K$ (= konstant) (4)

Na substitutie van (4) geeft (12) als oplossing (11).

Vergelijking (4) kan voor de punten 1 en 2 (bij kruin en kroon) geschreven worden als

$$v_1 R_1 = K \quad \text{en} \quad (4a)$$

$$v_2 (R_1 + h) = K \quad (4b)$$

Verder geldt dat

$$q / \ln \{ (R_1 + h) / R_1 \} = K \quad (5)$$

hetgeen wordt afgeleid in hoofdstuk 3.8. Indien q en h bekend zijn, zijn de onbekenden v_1 , v_2 , K en R_1 uit de vergelijkingen (11), (4a), (4b) en (5) op te lossen:

Eliminatie van K uit (4a) en (4b) geeft $v_2 (h + R_1) = v_1 R_1$

waarmee de v_2 uit (11) geëlimineerd kan worden:

$2gh = v_1^2 \left(1 - \left(\frac{R_1}{h + R_1} \right)^2 \right)$. Indien we met deze betrekking de

v_1 elimineren uit $q = v_1 R_1 \ln \{ (R_1 + h) / R_1 \}$ (zie (4a) en (5))

$$\text{dan volgt } q = (R_1 + h) R_1 \ln \left(\frac{R_1 + h}{R_1} \right) \cdot \sqrt{g / (R_1 + \frac{1}{2}h)} \quad (5a)$$

Voor de waarden $h = 3,5$ en 3 m is het verband tussen q en R_1 in figuur 5a uitgezet.

Vergelijking (5a) kan ook geschreven worden als

$$\frac{q}{\sqrt{2gR_2^3}} = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{1}{1 + R_1/R_2}} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (5b)$$

In figuur 5b is $q / \sqrt{2gR_2^3}$ tegen R_1/R_2 uitgezet.

B. Gelijke getallen van Thoma

$$\frac{p_1 - p_d}{\frac{1}{2}\rho v_1^2} = \frac{p_2 - p_d}{\frac{1}{2}\rho v_2^2} \quad (12)$$

met p_d = dampdruk (functie van de temperatuur) in N/m^2 ten opzichte van de atmosferische druk.

of
$$(p_1 - p_d) v_2^2 = (p_2 - p_d) v_1^2$$

Met behulp van formule (10) kunnen we schrijven (indien H_e de energiehogte in de hevelknie is)

$$(H_e - y_1 - \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_d}{\rho g}) v_2^2 = (H_e - y_2 - \frac{v_2^2}{2g} - \frac{p_d}{\rho g}) v_1^2$$

Substitueren we hierin (4a) en (4b) dan volgt

$$(H_e - y_1 - \frac{p_d}{\rho g}) (\frac{R_1}{R_1 + h})^2 = H_e - y_2 - \frac{p_d}{\rho g} \text{ of}$$

$$R_1 = \frac{h}{\sqrt{1 + \frac{h}{H_e - y_2 - \frac{p_d}{\rho g}}}} - 1 \quad (13)$$

Bij volledige kavitatie geldt dat het kavitatiegetal gelijk aan nul is ($p_{1,2} = p_d$). Als we negatieve getallen van Thoma uitsluiten dan geldt vergelijking (5b) en (13) alleen als

$$p_{1,2} > p_d \text{ of als } H_e - y_{1,2} - \frac{p_d}{\rho g} > \frac{v_{1,2}^2}{2g} \quad (13a)$$

Als het bovenwaterpeil y_b is en de hevellengte tussen inlaat en knie is ℓ'' , dan kan de energiehogte H_e in de hevelknie berekend worden uit

$$H_e = y_b - (\lambda \frac{\ell''}{4R_h} + \zeta_i + \zeta_b) \frac{q^2}{2gh^2} \quad (14)$$

Als we (14) substitueren in (13) dan ontstaat

$$R_1 = \frac{h}{\sqrt{1 + \frac{h}{y_b - (\lambda \frac{\ell''}{4R_h} + \zeta_i + \zeta_b) \frac{q^2}{2gh^2} - y_2 - \frac{p_d}{\rho g}}}} - 1 \quad (13b)$$

Vergelijking van de criteria A en B.

Met formule 5a kan voor verschillende kniehoogten (h) de relatie tussen q en R_1 worden gegeven (zie figuur 5). Met formule 13b kan eveneens de relatie tussen q en R_1 worden gegeven. Hiervoor moeten bepaalde waarden van h, $(y_b - y_2 - \frac{p_d}{\rho g})$ en $(\frac{\lambda l''}{4R_h} + \frac{1}{2}i + \frac{1}{2}b)$ bekend zijn.

De in figuur 5 gebruikte waarden worden in hoofdstuk 5.3 (schets-ontwerp voor een primaire dam) nader toegelicht.

De q - R_1 relaties zijn beperkt geldig; zie vergelijking (13a).

Substitutie van (14) en (13a) en eliminatie van $v_{1,2}$ middels

$v_{1,2} = q / \{(R_{1,2}) \ln (\frac{R_1 + h}{R_1})\}$ (zie vergelijking 4a, 4b en 5) geeft na enige omwerking dat (5b) en (13b) slechts gelden als

$$q < \sqrt{\frac{(y_b - y_{1,2} - \frac{p_d}{\rho g})^2 gh^2}{\frac{\lambda l''}{4R_h} + \frac{1}{2}i + \frac{1}{2}b + \frac{1}{\frac{(R_{1,2})^2 (\ln(h+1))^2}{h R_1}}} \quad (13c)$$

Ook de relatie tussen q en R_1 volgens (13c) is in figuur 5 getekend.

Opmerking:

Uit figuur 5 blijkt dat uitgaande van het kavitatiekriterium bij kleinere vervallen en een bepaald maatgevend debiet, een veel grotere afrondingsstraal moet worden toegepast dan wanneer van criterium A wordt uitgegaan. Een nadeel hiervan is, dat het luchtvolume in de hevelknie dan toeneemt; indien het onder- en bovenbeen onder α° lopen geldt immers

$$\frac{V_o}{bh} = \pi (R_1 + h) \left(\frac{90 - \alpha}{180} \right) + \frac{F'}{bh} \left[(R_1 + \frac{1}{2}h) \sin \alpha + y_1 - y_b - R_1 + \frac{1}{2}\Delta H \right] \quad (15a)$$

voor $\alpha = 45^\circ$ volgt dat $\frac{F'}{bh} = 2\sqrt{2}$ zodat

$$\frac{V_o}{bh} = 1,78 h + \frac{F'}{bh} \left[y_1 - y_b + \frac{1}{2}\Delta H \right] \quad (15b)$$

of

$$\frac{V_o}{F'} = y_1 - y_b + 0,63h + \frac{1}{2}\Delta H \quad (15c)$$

als V_0 het luchtvolume in de hevelknie,
 b de hevelbreedte,
 h de kniehoogte,
 R_1 de afrondingsstraal van de kruin,
 y het kruinpeil,
 y_b het peil van de bovenwaterstand,
 F' het oppervlak van de waterspiegels in onder- en bovenbeen,
en ΔH het verval over de hevel is.

Konklusies

- In het algemeen kan niet aan beide criteria tegelijkertijd voldaan worden.
- Kriterium A geldt bij één debiet. Voor dit debiet zal het maximale debiet genomen moeten worden waarbij de lucht aan de wanden net geheel wordt meegenomen.
- Het doel van kriterium B is dat op geen enkele plaats te lage kavitatietallen op zullen gaan treden (liggend in de buurt van de kavitatie-inceptietallen).
Dus kriterium B toepassen als laagste kavitatietallen optreden (lage bovenwaterstand, groot debiet).
- Bij hevels met klein verval zal kriterium A maatgevend zijn.
- Als de stralen veel groter worden dan volgens kriterium A wenselijk is, zal de druk bij de kroon aanzienlijk kleiner worden dan bij de kruin. Er ontstaat dan kans op luchtophoping daar waar de watersnelheden het laagst zijn.

3.10 Druk- en snelheidsfluctuaties door golven

Om een indruk te verkrijgen van de drukfluctuaties en snelheidsvariaties in de aangeslagen hevel ten gevolge van golven is uitgaande van een eerste orde golftheorie de navolgende globale berekening opgezet.

Voor een hevel met een konstante doorsnede en een oneindig stijve wand, waarbij aan één zijde vlak water is en aan de andere zijde een golf staat (die een maximale druk $\hat{p}$ gemiddeld over de heveldoorsnede geeft) kan de verandering van de snelheid in de tijd (gemiddeld over de doorsnede) als volgt worden uitgedrukt:

$$\frac{1}{g} \frac{d\bar{v}}{dt} = \Delta H - \frac{\hat{p}}{\rho g} \cdot \sin \omega t - \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (16)$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{d\bar{v}}{dt} = \text{versnellingsterm (l= lengte van de hevel)}$$

ΔH = verval

$\bar{v}$ = momentane snelheid, gemiddeld over de heveldoorsnede

$$\frac{\hat{p}}{\rho g} \sin \omega t = \text{drukfluctuatie door golven}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} = \text{weerstandsterm}$$

Voordat deze vergelijking verder wordt uitgewerkt volgt een nadere bepaling van de drukfluctuatie.

Drukfluctuatie.

Als ϕ de snelheidspotentiaal van de golf is kan de drukfluctuatie geschreven worden als:

$$\hat{p} \sin \omega t = \rho \frac{d\phi}{dt} \quad (17)$$

Als we er van uitgaan dat het dijktaalud zo flauw is dat er geen golf-reflekties optreden dan kan volgens een eerste orde golftheorie de snelheidspotentiaal geschreven worden als

$$\phi = \frac{g \cdot a}{\omega} \frac{\cosh \kappa (D-y)}{\cosh \kappa D} \cdot \cos (\kappa x \pm \omega t) \quad (18)$$

(18) in (17) geeft voor de drukamplitude

$$\hat{p} = \rho g a \frac{\cosh \kappa (D-y)}{\cosh \kappa D} \quad (19)$$

De drukamplitude gemiddeld over de hoogte (h) van de in- of uitlaat-konstruktie is:

$$\hat{\bar{p}} = \frac{1}{h} \int_0^h \hat{p} \cdot d(D-y) \quad (20)$$

Indien we (19) substitueren in (20) dan volgt:

$$\hat{\bar{p}} = \rho g \cdot a \cdot \frac{1}{\kappa h} \cdot \frac{\sinh \kappa h}{\cosh \kappa D} \quad (21)$$

Met deze vergelijking is de derde term van vergelijking (16) bekend. Bij toepassing hiervan zal nog een reductiefactor ingevoerd moeten worden doordat golven maar beperkt tegen de stroom in doordringen. Om vergelijking (16) te kunnen oplossen is het nodig de weerstandsterm te lineariseren.

Lineariseren

Nemen we voorlopig aan dat de snelheidsvariatiën (v) ten gevolge van golven klein zijn ten opzichte van de gemiddelde snelheid ($\bar{v}_0$) bij stil water en verval ΔH (hetgeen achteraf geverifieerd wordt), dan kan de wrijvingsterm als volgt geschreven worden:

$$\zeta_0 \frac{\bar{v}^2}{2g} = \zeta_0 \frac{(\bar{v}_0 + v)^2}{2g} \approx \zeta_0 \frac{\bar{v}_0^2}{2g} + \frac{\zeta_0 \bar{v}_0 \cdot v}{g} = \Delta H + \frac{\zeta_0 \bar{v}_0}{g} v. \quad (22)$$

Substitueren we dit in (16) dan ontstaat na enige omwerking:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\zeta_0 \bar{v}_0}{\ell} v = - \frac{\hat{p}}{\rho \ell} \sin \omega t \quad (23)$$

Indien we als oplossing in het linker lid substitueren

$$v = \hat{v} e^{i\omega t} \quad (24)$$

dan volgt

$$\hat{v} (i\omega + \frac{\zeta_0 \bar{v}_0}{\ell}) e^{i\omega t} = A e^{i\omega t} \quad (25)$$

De modulus van A is gelijk aan

$$\hat{v} \sqrt{\omega^2 + \frac{\zeta_0^2 \bar{v}_0^2}{\ell^2}} = \frac{\hat{p}}{\rho \ell} \quad (26)$$

De amplitude van de snelheidsvariatie door golven is dus

$$\hat{v} = \frac{\hat{p}}{\rho \ell \sqrt{\omega^2 + \frac{\zeta_0^2 \bar{v}_0^2}{\ell^2}}} \quad (27)$$

Formule (27) geldt indien $\hat{v} \ll \bar{v}_0$ (27a)

Opmerking: Doordat een verkorte schrijfwijze is ingevoerd, vervallen de formules (28) t/m (30).

Minimum energiehoopte in de hevelknie is

$$H_e = y_b - \left(\frac{\lambda_{21}}{4R_h} + \left\{ i + \frac{1}{2} \right\}_b \right) \frac{\bar{v}_{\max}^2}{2g} - \frac{1''}{1} \frac{\hat{p}}{\rho g} \quad (31)$$

(bij lineair drukverloop)

Zie hiervoor ook vergelijking (14)

Opmerking:

Het golfgetal uit vergelijking (21) $\kappa = \frac{2\pi}{L}$ is gerelateerd aan de golfperiode (zie bijvoorbeeld vergelijking (17); $T = \frac{2\pi}{\omega}$) volgens

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{g} \cdot L \coth \frac{2\pi \cdot D}{L}} \quad (32)$$

3.11. Zeewaterindringing

3.11.1. Zeewaterindringing per zeegolf

Met betrekking tot de zeewaterindringing door korte golven kunnen aan de hand van de waterstand ten opzichte van het kruinpeil een aantal gevallen onderscheiden worden. Als geldt dat

y = waterstand in het onderbeen van de hevel,

$\bar{y}$ = gemiddelde waterstand,

y_z = waterstand waarbij de hevel in tegengestelde richting zal aanslaan,

$y_{\min}$ = laagste waterstand,

$y_{\max}$ = hoogste waterstand,

y_1 = hoogte van de kruin en

y_2 = hoogte van de kroon

dan kunnen drie gevallen worden beschouwd

A: $y \geq y_z$

B: $y_1 < y < y_z$

C: $y < y_1$ (geen zoutindringing)

Uitgangspunt van deze berekening is dat de luchtinlaat (plaats, vorm, grootte) en de vorm van de hevelknie zo gekonstrueerd worden dat de hevel als gevolg van hoge benedenwaterstanden nooit zelf zal kunnen aanslaan.

Hierdoor vervalt mogelijkheid A. Voor het interval van B wordt $y_1 < y < y_2$ genomen. Voor de gevallen B en C kunnen de snelheidsvariëaties ($\frac{dx}{dt}$) in het onderbeen van de hevel in het algemeen als volgt beschreven worden:

$$\frac{l'}{g} \frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{\hat{p}}{\rho g} \sin \omega t + y - \bar{y} \quad (33)$$

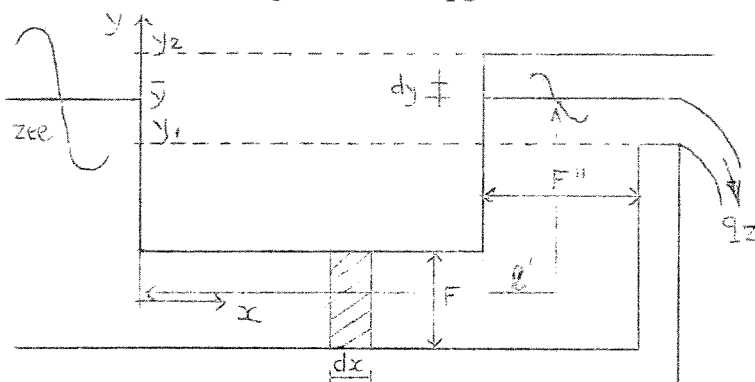
Deze formule geldt indien

- $\frac{dx}{dt}$ zo klein is dat de wrijvingsterm ($\frac{\gamma_0 (\frac{dx}{dt})^2}{2g}$) verwaarloosd mag worden
- als $(y - \bar{y}) \ll l'$ en
- als $(y - \bar{y})F'' \ll$ het luchtvolume in hevelknie.

Voor de gevallen B en C zal de term $(y - \bar{y})$, zijnde de waterstandsvariatie om de gemiddelde waterstand in het onderbeen, verder uitgewerkt worden.

B $y_1 < y < y_2$

Indien we ervan uitgaan dat de looptijd van de in de hevelknie optredende translatiegolf (bij variërend zeewaterindringingsdebiet) klein is ten opzichte van de golfperiode, zodat zich bij iedere waterstand y onmiddellijk het juiste debiet (quasie-permanentie) instelt, dan kan aan de hand van onderstaande schets de continuïteitsvergelijking als volgt worden opgezet:



uit de formule voor een volkomen overlaat volgt dat

$$q_z = m (y - y_1)^{3/2} \quad (34)$$

Uit de continuïteitsvergelijking volgt

$$q_z = F \cdot \frac{dx}{dt} - F'' \frac{dy}{dt} \quad (35)$$

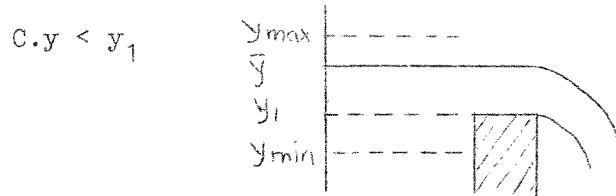
Vergelijking (34) en (35) leveren

$$F \frac{dx}{dt} = F'' \frac{dy}{dt} - m (y-y_1)^{3/2} \quad (36)$$

Vergelijking (36) gedifferentieerd naar t levert samen met vergelijking (33), indien de term $\frac{d^2x}{dt^2}$ wordt geëlimineerd:

$$\frac{F''}{F} \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + 3/2 \frac{m}{F} (y-y_1)^{1/2} \frac{dy}{dt} - \frac{g}{l'} y + \frac{\hat{p}}{\rho l'} \sin \omega t + \frac{g}{l'} \bar{y} = 0 \quad (37)$$

Oplossing uit (37) van $y(t)$ geeft in (34) gesubstitueerd het zeewater-indringingsdebiet als functie van de tijd. (Appendix I)



Zolang $y-y_1 > 0$ voldoet deze situatie aan vergelijking (36) en (37)

Voor $y-y_1 = 0$ wordt vergelijking (36)

$$F \frac{dx}{dt} = F'' \frac{dy}{dt} \rightarrow y = \frac{F}{F''} \cdot x + \text{konstante}$$

$$\text{als } x = 0 \rightarrow y = \bar{y} \rightarrow y = \frac{F}{F''} x + \bar{y} \quad (38)$$

Als we dit invullen in vergelijking (33) dan volgt

$$\frac{1}{g} \frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{\hat{p}}{\rho g} \sin \omega t + \frac{F}{F''} \cdot x \quad (39)$$

Voor $y-y_1 < 0$ voldoet (39) eveneens.

Oplossing van vergelijking (39)

Een algemene oplossing voor deze vergelijking is

$$x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \quad (40)$$

Substitutie van (40) in (39) geeft

$$C_1 = \frac{\hat{p}}{\rho g} \frac{1}{\frac{1}{g} \omega^2 + \frac{F}{F''}}; C_2 = 0 \quad (41)$$

Uit (38), (40) en (41) volgt dat de fluktuatie van de waterstand in het onderbeen

$$(y-\bar{y}) = \frac{\hat{p}}{\rho g} \left(\frac{1}{\frac{1}{g} \omega^2 + \frac{F}{F''}} \right) \cdot \sin \omega t \quad (42)$$

(voor $y \leq y_1$)

Vergelijking (42) geldt verder onder dezelfde aannamen als vergelijking (33). Aan de hand van het volgende getallen voorbeeld worden deze aannamen geverifieerd (zie ook hoofdstuk 5.3., schetsontwerp voor een primaire dam).

Voorbeeld

Voor $\kappa=0,1$ ($L=65$ m), $h=5$ m, $D=10$ m en $a=2$ m, geldt volgens vergelijking (21) dat

$$\frac{\hat{p}}{\rho g} = 2 \cdot \frac{1}{0,5} \cdot \frac{\sinh 0,5}{\cosh 1} = 1,35 \text{ mwk.}$$

Als $l'=200$ m, $\omega=0,8$ ($T \approx 8$ s) en $F/F''=0,7$ dan volgt uit (42)

$$(y_{\max} - \bar{y}) = 0,07 \text{ m. De maximale horizontale snelheid is gelijk aan (zie (38) en (42))}$$

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \frac{F''}{F} \cdot \omega (y_{\max} - \bar{y}) = 0,08 \text{ m/s} \quad (43)$$

Voor $\left\{ \right\}_0 \approx 2,2$ is $\left\{ \right\}_0 \left(\frac{d\hat{x}}{dt} \right)^2 \approx 0,0007$. Uit een en ander is af te leiden dat

inderdaad geldt dat

$$\left\{ \right\}_0 \frac{\left(\frac{d\hat{x}}{dt} \right)^2}{2g} \ll (y_{\max} - \bar{y}),$$

dat $(y_{\max} - \bar{y}) \ll l'$

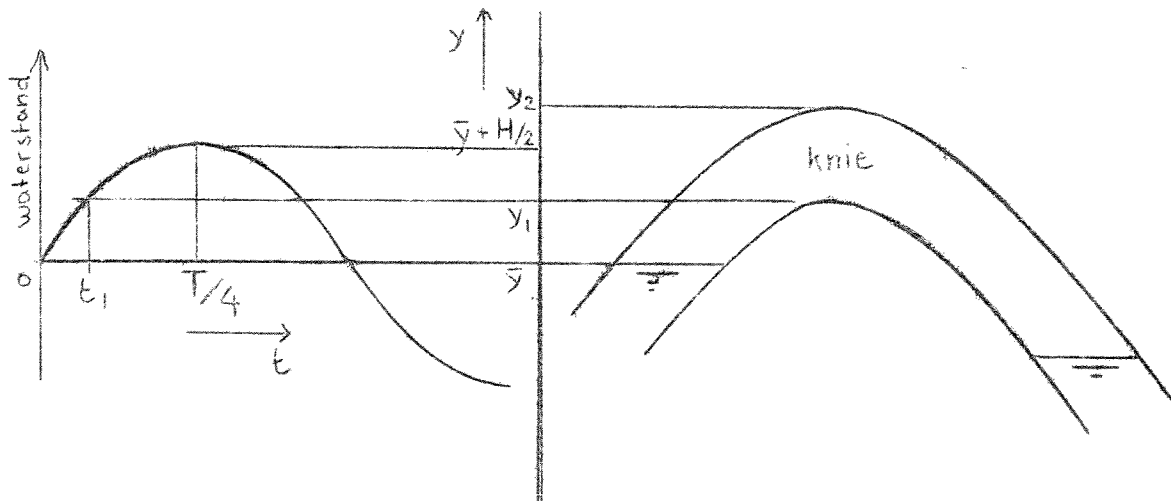
en dat $(y_{\max} - \bar{y}) \ll \frac{\text{luchtvolume}}{F''}$ (=orde 5)

Opmerkingen

- Uit het rekenvoorbeeld volgt dat de golfdoordringing vanaf het benedenwater bij het schetsontwerp (figuur 19) sterk gedempt is:
 $(y - \bar{y}) \ll \hat{p}/\rho g$.
- In Appendix I wordt vergelijking (37) numeriek opgelost. Het stroomschema van de Appendix geeft de variatie van de zeewaterindringing ten gevolge van één korte golf voor $y < y_2$; Als een golftop de hevelkroon raakt wordt de berekening gestopt.
 Door toepassing van een verkorte schrijfwijze zijn de formules 44 t/m 46 vervallen.

3.11.2. Zeewaterindringing per getij (geen golven)

Als de afstand tussen hiel en uitlaat groot is, zal de demping van het water aldaar zo groot zijn dat de waterstand in het onderbeen nauwelijks meer fluktueert als gevolg van korte golven op het benedenwater. Als we daarom in eerste instantie de invloed van de korte golf op de zeewaterindringing verwaarlozen, dan kan het volume zeewater dat per getij binnendringt op vrij eenvoudige wijze berekend worden. De resultaten van deze berekening kunnen in een later stadium gekoppeld worden aan statistische waterstandsgegevens (overschrijdingslijnen in keren per jaar).



Indien er een getij voorkomt met $\bar{y} < y_1 < \bar{y} + H/2$ dan begint de zeewaterindringing op het tijdstip t_1 als $y=y_1$. Als we als eerste benadering voor de waterstand schrijven:

$$y = \bar{y} + H/2 \sin \omega t \quad (47)$$

$$\text{dan volgt hieruit } t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{2}{H} (y_1 - \bar{y}) \quad (48)$$

Het zeewatervolume per m' hevelbreedte volgt uit substitutie van (34) en (48) in $V_z = \int q_z dt$.

Per getij geldt

$$V_z = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{2}{H} (y_1 - \bar{y}) \cdot 2 \cdot \int_0^{T/4} m (\bar{y} - y_1 + \frac{H}{2} \sin \omega t)^{3/2} dt \quad (49)$$

De analytische oplossing hiervan is niet eenvoudig.

Via opsplitsing van de integraal in de stukken

$$\int \frac{(\bar{y}-y_1)^2}{\sqrt{\bar{y}-y_1+\frac{H}{2}\sin\omega t}} dt, \int \frac{(\bar{y}-y_1)H\sin\omega t}{\sqrt{\bar{y}-y_1+\frac{H}{2}\sin\omega t}} dt \text{ en } \int \frac{(\frac{H}{2}\sin\omega t)^2}{\sqrt{\bar{y}-y_1+\frac{H}{2}\sin\omega t}} dt,$$

worden integralen verkregen waarvan de oplossingen in de literatuur gegeven worden (Gradshteyn en Ryzhik).

De oplossingen echter zijn gekompliceerde elliptische functies van de eerste soort (formules 2.571. 1,2,3 in G en R). Een numerieke oplossing van (49) ligt meer voor de hand (Appendix II).

Een nauwkeuriger beschrijving van het getij (47) kan dan ook op eenvoudige wijze ingevoerd worden.

3.11.3. Eigen-frekwentie onderbeen

Als de eigen-frekwentie van de variërende waterstand in het onderbeen gelijk wordt aan de golffrekwentie, dan geldt oplossing (42) niet meer, omdat de waterstand dan zal gaan opslingeren.

De eigen-frekwentie volgt uit de formule

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho g F}{\rho l' F''}} = \sqrt{\frac{g}{l'}} \sin \alpha \quad (43)$$

Dit geldt indien het onderbeen onder α^0 loopt.

(Voor $\alpha=45^0$ en $l'=200$ m wordt $\omega=0.195^{\text{rad}}/\text{s}$ en $T=32\text{s}$).

3.11.4. Rekapitulatie

Het binnendringend volume zeewater ten gevolge van langzaam (periode $\geq 20\text{s}$) variërende waterstanden kan per getij (zonder golven) met vergelijking (49) berekend worden. De variatie op dit volume indringend zeewater als gevolg van korte golven ($T < 20\text{s}$) kan met behulp van vergelijking (37) per korte golf worden bepaald. Genoemde vergelijkingen worden respektievelijk in Appendix II en I numeriek opgelost, terwijl met de bijbehorende stroomdiagrammen de stukken van een komputerprogramma kunnen worden opgesteld.

Een totale statistische berekening kan pas gemaakt worden indien de vorm waarin de benodigde gegevens ter beschikking komen bekend is. Een komplikatie is dat de voor dit onderwerp van belang zijnde hoge waterstanden

en hoge korte golven niet meer ongekoppeld beschouwd kunnen worden (in tegenstelling tot de lage waterstanden, zie 3.2.4.). Van de relatie tussen hoge vloedstanden en korte golfhoogten zal één en ander bekend moeten zijn.

Indien de zeewaterindringing te groot wordt of indien indringing vermeden moet worden zullen extra maatregelen genomen dienen te worden. Een mogelijkheid is de vakuümpomp te gebruiken om een zekere overdruk in de hevelknie aan te brengen. Hiermee worden extra afsluitmechanismen vermeden. Wel bestaat de kans dat het inlaatplafond hierdoor iets dieper gelegd moet worden.

3.12. Kavitatie

Daar waar de drukken minimaal zijn, bestaat de kans dat kavitatie op zal treden. Een karakteristieke waarde hiervoor is het getal van Thoma (kavitatiegetal):

$$\sigma = \frac{p - p_d}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (50)$$

Bij afnemende druk of oplopende snelheid zal de waarde van σ zo klein worden dat kavitatie gaat optreden. De grenswaarde van σ is σ_i het kavitatie-inceptiegetal. Zuiver theoretisch zou $\sigma_i = 0$ moeten zijn bij permanentie. In werkelijkheid hangt de grootte van σ_i af van een groot aantal factoren zoals: turbulentie, druk, stroombeeld, luchtgehalte, dampdruk (temperatuur) en verontreinigingen.

De literatuurgegevens betreffende kavitatie lopen ver uiteen. De beste benadering ter bepaling van de waarde van σ_i volgt uit modelonderzoek.

Omdat wandkavitatie bij hevels erg belangrijk is, en om een indruk te verkrijgen van de aanpak van dit probleem is het volgende rekenschema opgezet. De absolute uitkomsten zijn niet zonder meer bruikbaar.

De gepresenteerde grafieken zijn afgeleid uit onderzoek aan een leiding met gladde wand waarop een ruwheid (richeltje) wordt aangebracht. De vorm van het richeltje en de plaats van meting bepalen in sterke mate de uitkomsten. Bij de hevel zal bovendien de grenslaag in de hevelknie niet geheel ontwikkeld zijn.

Voorbeeld.

De ruwheid van de hevelwand is k . Door de ruwheid treedt bij de wand turbulentie op waardoor kavitatie ontstaan kan. Verschillende auteurs (Borden and Holl en Benson) geven relaties tussen σ_1 en het lokale Reynoldsgetal of tussen σ_1 en de relatieve ruwheid (ruwheid/grenslaagdikte) zoals Benson en Wislicenus; [16] bladzijde 247.

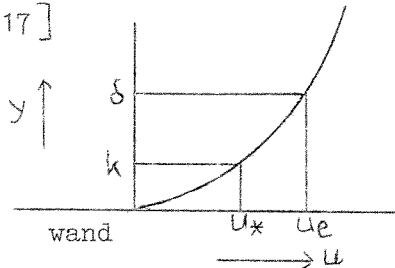
Uit het diagram van Moody ([15] of uit figuur 6) kan de wrijvingscoëfficiënt λ gevonden worden. Hiermee is de schuifspanning bekend:

$$\tau = \lambda / 4 \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot \bar{v}^2 \quad (\text{Darcy, Fanning en Weisbach}) \quad (51)$$

$$\text{De schuifspanningssnelheid } u_{\#} = \sqrt{\tau / \rho}. \quad (52)$$

De snelheidsverdeling (in een rechthoekige goot) bij turbulente stroming is volgens Wooldridge en Muzzy [17]

$$\frac{u_e - u}{u_{\#}} = -2,44 \ln \left(\frac{y}{\delta} \right) + 2,50 \quad (53)$$



Als eerste benadering geldt midden in de grenslaag

$$\text{voor } y = \frac{1}{2} \delta \text{ dat } u = \frac{1}{2} u_e; \text{ ingevuld in (53) levert dit } u_e = 8,4 u_{\#} \quad (54)$$

voor $y = k$ geldt dat $u = u_{\#}$; substitueren we dit met (38) in (37) dan volgt

$$\delta = 7,4 k \quad (55)$$

Het lokale Reynoldsgetal aan de rand van de grenslaag

$$R_e = \frac{u_e \cdot \delta}{\nu} \quad (56)$$

Uit de grafieken van Benson en Borden and Holl (zie figuur 18) kunnen bij het lokale Reynoldsgetal (56) en de relatieve ruwheid k/δ behorende kavitatie-inceptiegetallen gevonden worden.

Opmerking:

- Omdat σ_1 in een overeenkomstige situatie niet bekend is kan nog geen goed criterium uitgewerkt worden. Als $\sigma > 2$ lijkt de constructie veilig met betrekking tot kavitatie. Is $\sigma > 0$ dan moet het ontwerp gewijzigd worden. Is $0 < \sigma < 2$ dan

- σ_1 bepalen met modelonderzoek (groot model).
- Uit de definitie van het kavitatiegetal blijkt dat beveiliging tegen kavitatie wordt verkregen door drukvergroting en/of snelheidsverlaging.

Drukverhoging - lagere hevelknie,
- hogere bovenwaterstanden toepassen,
- debietbegrenzing (begrenzing van het verval),
- knie vlak achter de inlaat en ver van de uitlaat,
- grote uitstroomverliezen,
- wijde inlaatkonstruktie.

Snelheidsverlaging - debietbegrenzing,
- grotere wandruwheid,
- relatief wijde knie.

Bovendien kan kavitatie door een aantal maatregelen beperkt worden:
goede inlaatvorm (turbulentie),
gladde kniewand (wandkavitatie).

Kriterium

Als σ_1 bekend is lijkt een goede aanpak:

Drukken bij kruin en kroon (voor een aantal kruin- en kroonpeilen) in grafiekvorm uitzetten tegen het verval (voor een aantal bovenwaterstanden en golfhoogten). Indien bekend is gedurende welke tijd een bepaalde golfhoogte en een bepaalde waterstand tegelijkertijd kunnen optreden kunnen hieruit grafieken afgeleid worden waarin kavitatiegetallen tegen overschrijdingspercentages staan.

Als σ_1 bekend is kan dan bij iedere kruin- en kroonhoogte de tijdsduur per jaar gevonden worden waarin de hevel kaviteert.

Men kan meer kavitatie toelaten als bepaalde oppervlakte beschermende maatregelen worden genomen, in extreme gevallen kan een uitwisselbare staalbekleding worden toegepast.

3.13. Vakuümpomp

In dit hoofdstuk wordt een formule afgeleid waarmee de benodigde vakuümpompkapaciteit voor een hevel berekend kan worden.

De volgende symbolen worden gebruikt:

V_0 (m^3) het luchtvolume in de hevelknie bij 1 atmosfeer (op het moment dat de vakuümpomp gestart wordt: tijdstip t_0).

- y (m) stijging van de waterspiegel in de hevelbenen ten opzichte van de waterstanden op het tijdstip t_0 .
 F' (m²) het totale oppervlak van de waterspiegels in onder- en bovenbeen.
 K (m³/s) de netto capaciteit van de vakuümpomp (m³ lucht per s).
 N (mwk.) atmosferische druk.
 ρ_{10} (kg/m³) dichtheid van lucht op het tijdstip t_0 .
 H_z (m) hoogteverschil tussen de bovenwaterstand en het waterniveau waarop de hevel zelf aanslaat.
 T_z (s) tijdsduur tussen starten vakuümpomp en zelf aanslaan van de hevel.
 c (-) de kompressieverhouding van de vakuümpomp.
 y_1 (m) kruinhoogte boven de bovenwaterstand.
 y_2 (m) kroonhoogte boven de bovenwaterstand.
 Het luchtvolume op een tijdstip t met $t_0 \leq t \leq T_z$ is

$$V = V_0 - y \cdot F' \quad (57)$$

Voorlopig wordt F' even onafhankelijk van y verondersteld.

Voor een isothermische toestandsverandering geldt

$$\frac{\rho_1}{\rho_{10}} = \frac{N-y}{N} \quad (58)$$

In een tijdje dt stijgt het water in de hevelbenen dy . De druk was $(N-y)$ en wordt $(N-y-dy)$ mwk; het volume was V en wordt $V-F'dy$; de dichtheid was

$$\rho_{10} \frac{N-y}{N} \text{ en wordt } \rho_{10} \frac{N-y-dy}{N}$$

De massa lucht die per tijdseenheid verpompt wordt is $K \cdot \rho_1$ in kg/s.

De massa lucht die in een tijdje dt verpompt wordt is

$$K \cdot \rho_1 \cdot dt = V \cdot \rho_{10} \cdot \frac{N-y}{N} - (V-dy \cdot F') \rho_{10} \cdot \frac{N-y-dy}{N} \quad (59)$$

Substitueren we hierin (58) dan volgt na enig omwerken

$$K dt = \left(\frac{V-F'dy}{N-y} + F' \right) dy.$$

Wordt de term $\frac{F'}{N-y} (dy)^2$ hierin verwaarloosd, en substitueren we (57) dan volgt

$$K dt = \left(\frac{V_0 - yF'}{N-y} + F' \right) dy.$$

Uit de overweging dat als $t=T_z$, $y=H_z$ volgt dat

$$\int_0^{T_z} K dt = \int_0^{H_z} \left\{ \frac{V_0 - F' \cdot N}{N-y} + 2 F' \right\} dy \quad (60)$$

hieruit volgt

$$K = \frac{V_0}{T_z} \left\{ \frac{2F' \cdot H_z}{V_0} + \left(1 - \frac{F' \cdot N}{V_0} \right) \ln \left(\frac{N}{N-H_z} \right) \right\} \quad (61)$$

Indien de hevel bij een gelijke boven- en benedenwaterstand aangeslagen wordt, dan zal het luchtvolume nul zijn voor een maximale waarde van $y(y=y_2)$.

Uit formule (57) volgt voor $V=0$ dat $V_0/F'=y_2$
(Zie ook de veronderstelling bij formule (57), hetgeen niet geheel in overeenstemming is met formule (15)).

Vergelijking (61) wordt hiermee

$$K = \frac{V_0}{T_z} \left\{ \frac{2H_z}{y_2} + \left(1 - \frac{N}{y_2} \right) \ln \left(\frac{N}{N-H_z} \right) \right\} \quad (61a)$$

Als de hevel pas aanslaat als het water de kroon raakt dan geldt

$H_z=y_2$ en

$$K = \frac{V_0}{T_z} \left\{ 2 + \left(1 - \frac{N}{y_2} \right) \ln \left(\frac{N}{N-y_2} \right) \right\} \quad (61b)$$

De formules (61) gelden voor $c < 1 - H_z/N$ en

$$y_1 < H_z \leq y_2 \quad (61c)$$

In figuur 14 is met behulp van formule 61a het verband uitgezet tussen $\frac{K \cdot T_z}{V_0}$ en $\frac{H_z}{y_2}$ voor een aantal waarden van $\frac{H_z}{N}$.

Figuur 15 geeft het verband tussen $\frac{K \cdot T_z}{V_0}$ en $\frac{H_z}{N}$ voor een hevel die geheel mechanisch aangeslagen moet worden (vergelijking (61b)).

3.14. Luchtinlaat, debietbegrenzing

Er zijn een aantal redenen waarom het inlaten van lucht in de hevelknie gewenst kan zijn:

- a. bij het aanslaan: minder snelle overgang van de volkomen overlaat afvoer naar de gesloten leiding afvoer; minder steile translatiegolven;
- b. bij de aangeslagen hevel: begrenzing van het maximale debiet (onder andere in verband met bodembescherming) en verhoging van de druk in de hevelknie (kavitatie);
- c. bij het afslaan: stoppen afvoer; overschrijding maximum toelaatbare verval; enz.

In dit hoofdstuk wordt de luchtinlaat besproken, voornamelijk met betrekking tot de debietbegrenzing (ad b).

De in de knie en in het onderbeen van de aangeslagen hevel aanwezige luchtbellen veroorzaken een profielvernauwing waardoor het debiet afneemt.

Indien door vergroting van het luchtdebiet het waterdebiet afneemt, kunnen instabiliteiten in de stroming ontstaan. Omdat zich een luchtbel in de knie vormt (waardoor het debiet afneemt, de stroomsnelheid even toeneemt, het luchttransporterend vermogen toeneemt, het luchtvolume afneemt, het waterdebiet toeneemt, het luchtdebiet toeneemt, het waterdebiet afneemt, het luchtvolume toeneemt, etc.) wordt het debiet instabiel. Indien het luchtdebiet nog verder wordt opgevoerd, kan opnieuw een stabiel stroombeeld ontstaan. Bij welke luchtdebieten grote instabiliteiten voorkomen hangt onder andere sterk af van de plaats van de luchtinlaat in de hevel en van de vormgeving van de knie. Lucht inlaten in de top van de kruin lijkt optimaal (zie [2]).

Bij grote instabiliteiten kan het luchtvolume zo groot en het resterende waterdebiet zo klein worden, dat het water de luchtbel niet meer kan verkleinen waardoor de hevel zal afslaan.

Proeven waarbij getracht werd het luchtdebiet zo af te regelen dat het waterdebiet konstant bleef bij variërend verval, leveren de in figuur 16 getekende meetpunten op (gemiddelde waarden bij stationair stroombeeld).

Voor het q_0 debiet is van de gemiddelde meetpunten ook de maximale afwijking ten gevolge van instabiliteiten aangegeven. Uit figuur 16 blijkt onder andere dat de debietreduktie bij grote vervallen beperkt is: na het vergroten van het luchtdebiet is het waterdebiet zo sterk gereduceerd dat bij het verder verkleinen van het luchtdebiet het waterdebiet kleiner wordt en de hevel wil afslaan.

Voor een ontwerp voor het deltagebied is dit waarschijnlijk minder belangrijk omdat een benodigde debietbegrenzing van bijv. 50% realiseerbaar kan zijn; bovendien kan het afslaan van de hevel in extreme omstandigheden zelfs voordelen bieden.

Indien het debiet door het inlaten van lucht wordt begrensd is een regeling van het luchtdebiet noodzakelijk.

Naast een analyse van de wenselijkheid van het lucht inlaten zal ook de manier van regelen beschouwd moeten worden. Mogelijkheden zijn: regelen op druk, snelheid of verval of afgeleiden daarvan. In [2] is een proportionele regeling op druk onderzocht; met andere woorden $\dot{a} = A(p - p_0)$ met α = de klephoek, p = de druk, p_0 = de gewenste druk, A een evenredigheidskonstante die voor het openen en het sluiten een verschillende waarde kan hebben. Uit uitgebreide proefnemingen, waarbij onder andere waarden van A systematisch werden gevarieerd, bleek deze regeling niet erg stabiel te zijn. Een verbetering kan zijn A met het verval te laten variëren. Een andere mogelijkheid is een differentiërende regeling toe te passen:

$$\dot{a} = A \frac{d}{dt} (p - p_0)$$

Ook de plaats waar, in dit voorbeeld, de drukken gemeten moeten worden is voor de regeling van belang.

Indien het luchtdebiet (klepstand van de luchtinlaat) op druk wordt afgeregeld, zal door golven (drukfluctuaties) een tragere regeling nodig zijn.

Uit bovenstaande opsomming van enkele aspecten en tendenzen met betrekking tot debietbegrenzing en luchtregeling moge blijken dat deze zaak zo detaillistisch is, dat in dit algemene stadium van onderzoek geen verdere uitwerking mogelijk is.

Wel kan gesteld worden dat een aanzienlijke debietreduktie door lucht-inlaten mogelijk is en dat de gekompliceerdheid (kosten) van de lucht-regeling sterk afhankelijk is van de eisen die men er aan stelt.

4. Aanpak hevelontwerp (algemeen)

Ten behoeve van de aanpak van een hevelontwerp lijkt het zinvol een globale werkwijze te schetsen.

Dit wordt puntsgewijs en zoveel mogelijk in chronologische volgorde gedaan; gerefereerd wordt naar de relatienummers van de tabel uit 5.1.

- a. Vaststellen plaats: beschikbare ruimte, damprofiel, bodemkonfiguratie; hieruit hevellenlengte bepalen (na keuze heveltype).
- b. Verzamelen waterstanden (getij, golven, opwaaiing, etc.); zie ook hoofdstuk 6.
- c. Definiëren gewenste totale debiet per m verval.
- d. Bepalen van de plaats van de hevelknie met behulp van r 11 en r 12 (zie ook r 9 en r 10).
- e. Bepaling van het kruinpeil met behulp van r 1, r 2 en r 3.
- f. Bepaling van het maximum toelaatbare kroonpeil (r 4). De kniehoogte wordt begrensd door kruinpeil en mogelijk kroonpeil en zal nu bepaald moeten worden, rekening houdend met de totale beschikbare breedte, r 5, r 8, konstruktieve en economische aspecten (veel kleine hevels of enkele grote, debiet per m': dimensionering stortebed, type uitlaatkonstruktie, konstruktiemethode, materiaalkeuze, etc.).
- g. De peilen van de plafonds van in- en uitlaat kunnen daarna middels r 13 en r 14 worden bepaald.
- h. Afschatten van afrondingsstraal onder andere met behulp van r 15.
- i. Controleberekening uitvoeren met betrekking tot de optredende drukken.

Met behulp van bovenstaande en met inachtneming van het gestelde in hoofdstuk "vormgeving" kan een eerste ontwerp van de hevel gemaakt worden, waarna door middel van modelonderzoek het ontwerp moet worden bijgeschaafd.

5. Ontwerp (figuur 19)

5.1. Variabelen

In hoofdstuk 2 zijn een aantal mogelijkheden genoemd voor het gebruik van hevels. Met betrekking tot het deltagebied is in hoofdstuk 3 getracht tot een algemeen hevelontwerp te komen. Een groot aantal variabelen speelt bij dit ontwerp een rol. Een gedeelte van deze variabelen wordt in deze studie bepaald.

Een aantal echter is niet bepaald, òf omdat er onvoldoende prototypegegevens beschikbaar zijn en/òf omdat ze niet met behulp van de bekende literatuur geëvalueerd kunnen worden.

Aan de hand van een ontwerp voor een primaire dam is onderzocht welke variabelen wel of niet bepaald kunnen worden (met behulp van dit verslag), welke gegevens (en in welke vorm) beschikbaar zouden moeten zijn (hoofdstuk 6) en welke variabelen met behulp van komputer of modelonderzoek nader bekeken zouden moeten worden (hoofdstuk 1.6.).

Met behulp van de in hoofdstuk 3 besproken relaties wordt in dit hoofdstuk getracht een aantal variabelen te bepalen. In de volgende tabel wordt een overzicht van deze relaties gegeven.

relatie no.	variabelen	figuur no.	hoofdstuk no.
r 1	kruinpeil - zoutindringing		3.11.
r 2	kruinpeil - druk hevelknie	10	3.8.
r 3	kruinpeil - pompkapaciteit	m.b.v. 14	3.13.
	kroonhoogte - zoutindringing		3.11.
r 4	kniehoogte - druk hevelknie	11	3.8.
r 5	hydraulische straal - debiet	8	3.7.
r 6	weerstandskoefficiënt - debiet	7	3.7.
r 7	debiet - druk hevelknie	12	3.8.
r 8	luchtvolume knie - pompkapaciteit	15	3.13.
r 9	golven - druk hevelknie		3.10.
r 10	golven - zoutindringing		3.11.
r 11	plaats knie - druk hevelknie	13	3.8.
r 12	plaats knie - zoutindringing		3.11.
r 13	uitlaatplafond - luchtlekage		3.2.4.
r 14	inlaatplafond - luchtlekage		3.3.
r 15	afrondingsstraal - druk hevelknie	m.b.v. 9	3.9.

5.2. Schetsontwerp

Om de gedachte te bepalen is voor een primaire dam een schetsontwerp gemaakt. Bij de onbekende grootheden wordt in figuur 19 verwezen naar het relatienummer van bovenstaande tabel of naar een hoofdstuknummer van dit verslag.

De overwegingen die tot dit ontwerp hebben geleid worden in 1.5. samengevat.

5.3. Enkele berekeningen

5.3.1. Aannamen

- Met betrekking tot het aanslaan belangrijke minimale waterstanden: boven N.A.P. -1 m, beneden N.A.P. -2m.
- Met betrekking tot het (maatgevende "maximale") debiet extreme waterstanden boven N.A.P. +1 m, beneden N.A.P. -3,9 m.
(Onderschrijdingsfrequentie is 10^{-4} keren/jaar; zie [8].)
- Peil uitlaatplafond N.A.P. -5 m (golfhoogte: 6 m bij een waterstand van N.A.P. -2 m).
- Peil tussen hiel en uitlaat N.A.P. -2 m.
- Kruinpeil N.A.P. +4 m (overschrijding 1 maal/10 jaar).
- Aantal hevels 8.
- Knie-afmetingen 3,5 x 7,5.
- Wandruwheid (afgewerkt beton) $k = 2 \cdot 10^{-3}$ m.
- Inlaatplafond N.A.P. -5 m (waterstand N.A.P. -1 m, golfhoogte 3 m, 5x Bernoulli-term (bij $\bar{v} = 3\text{m/s}$) = 2,5 m).
- Inlaatverlies $\sum_i = 0$.
- Bochtverlies $\sum_b = 0,2$.
- Uitlaatverlies $\sum_u = 1$.
- Hevellengte = 300 m.
- Hevelknie op 50 m van de inlaat.

5.3.2. Debiet (3.7.)

De hydraulische straal $R_h = \frac{h \times b}{2(h+b)} = 1,19$ m in de hevelknie.

Voor $k = 2 \cdot 10^{-3}$ en $R_h = 1,19$ m volgt uit figuur 6 dat $C = 70$ en $\lambda = 0,016$.

De totale verliescoëfficiënt $\sum_o = 2,2$.

- I. Voor het maatgevende maximale verval van 4,9 m volgt uit (2) dat $\bar{v} = 6,6 \text{ m/s}$, $q = 23 \text{ m}^2/\text{s}$ en $Q = 172 \text{ m}^3/\text{s}$ per hevel.
- II. Voor een verval van 2,9 m is $\bar{v} = 5,1 \text{ m/s}$, $q = 18 \text{ m}^2/\text{s}$ en $Q = 135 \text{ m}^3/\text{s}$ per hevel (zie ook figuur 7 en 8).
- III. Voor een verval van 1 m is $\bar{v} = 3 \text{ m/s}$, $q = 10,5 \text{ m}^2/\text{s}$ en $Q = 79 \text{ m}^3/\text{s}$ per hevel (zie ook figuur 7 en 8).

5.3.3. Drukken in hevelknie (3.8.)

- I. $\Delta H = 4,9 \text{ m}$

Figuur 9 geeft de snelheidsverdeling in de hevelknie als gevolg van de kromming. Voor $R_2/R_1 = 2$ (zie 5.3.4.) volgt hieruit dat de snelheid bij de knie $v_1 = 1,45 \bar{v}$ en de snelheid bij de kroon $v_2 = 0,725 \bar{v}$.

Bij het maximaal verval (= 4,9 m) geldt nu dat $\bar{v} = 6,6 \text{ m/s}$, $v_1 = 9,55 \text{ m/s}$ en $v_2 = 4,78 \text{ m/s}$.

De energiehogte van de hevelknie (zie ook figuur 17) bij dit verval is volgens (14) : $H_e = \text{N.A.P.} (+1 - 0,3 \cdot \frac{6,6^2}{2g}) \text{ m}$.

$H_e = \text{N.A.P.} + 0,33 \text{ m}$.

Het piëzometrisch niveau bij kruin en kroon ($pn_{1,2} = H_e - \frac{v_{1,2}^2}{2g}$) is respectievelijk N.A.P. -4,32 m en N.A.P. -0,82 m.

Omdat $pn_{1,2} = y_{1,2} + \frac{p_{1,2}}{\rho g}$, is de drukhoogte zowel bij kruin als kroon -8,32 mwk. De drukken zijn gelijk omdat bij dit verval de kruinstraal bepaald is met het gelijke-drukken criterium (zie 4.4.4.).

Bovenstaande berekening die stapsgewijs is uitgevoerd kan ook direct met behulp van vergelijking (8) worden gedaan.

- II. $\Delta H = 2,9 \text{ m}$.

Voor de laagste boven- en benedenwaterstanden waarbij nog moet kunnen worden afgevoerd, respectievelijk N.A.P. -1 m en N.A.P. -3,9 m zijn de snelheden en drukken: $\bar{v} = 5,1 \text{ m/s}$, $v_1 = 7,3 \text{ m/s}$, $v_2 = 3,65$, $H_e = \text{N.A.P.} -1,39 \text{ m}$, $p_1/\rho g = -8,11 \text{ mwk}$ en $p_2/\rho g = -9,47 \text{ mwk}$.

- III. $\Delta H = 1 \text{ m}$.

Bij G.L.W. = N.A.P. -1 m (G.H.W. = N.A.P. +1,4 m) en Oosterschelde-peil = N.A.P. dan is $\bar{v} = 3 \text{ m/s}$, $v_1 = 4,35 \text{ m/s}$, $v_2 = 2,18 \text{ m/s}$, $H_e = \text{N.A.P.} -0,14 \text{ m}$, $p_1/\rho g = -5,00 \text{ mwk}$ en $p_2/\rho g = -7,78 \text{ mwk}$.

5.3.4. Afrondingsstraal van de kruin

Uit figuur 5 is te zien dat indien de kruinstraal bepaald wordt met criterium A (gelijke drukken) of criterium B (gelijke getallen van Thoma) de kruinstraal (R_1), bij het maximale debiet ($q=23 \text{ m}^2/\text{s}$) en een kruinhoogte van 3,5 m gelijk wordt aan 3,5 respectievelijk 6,5 m. Bij het maximale debiet is criterium B wellicht het belangrijkste. Dus R_1 zou 6,5 m moeten worden.

Deze relatief grote straal lijkt minder wenselijk in verband met de te ongelijke drukken (luchtophopping bij de kroon) en een te groot lucht-volume (vakuumpompcapaciteit).

Bij normale debieten ($q=10,5 \text{ m}^2/\text{s}$) kan criterium A belangrijk zijn. Hieruit volgt dat R_1 ongeveer 1 m zou moeten worden. Bij deze kleine straal worden echter bij grotere debieten de drukken bij de kruin gauw gelijk aan nul (figuur 5); bovendien zullen de bochtverliezen hierdoor teveel toenemen. Als kompromis is genomen $R_1 = 3,5 \text{ m}$.

De lijn in figuur 5 voor criterium B geldt voor:

- een bovenwaterstand (y_b) van N.A.P. +1 m, een kruinpeil (y_1) van N.A.P. +4 m en een kniehoogte van 3 of 3,5 m,
- een dampdruk $\frac{p_d}{\rho g} = -9,76 \text{ mwk}$ (bij een temperatuur van 20° C en een atmosferische druk van 10 mwk (absoluut),
- dus $y_b - y_1 - \frac{p_d}{\rho g} = 1 - 4 + 9,76 = 6,76 \text{ m}$,
en $y_b - y_2 - \frac{p_d}{\rho g} = 3,76 \text{ (h=3 m) en } 3,26 \text{ m (h=3,5 m) en}$
- een totale weerstand in het bovenbeen van

$$\frac{\lambda l''}{4R_n} + \sum_i + \sum_{b/2} = \frac{0,016 \times 50}{4 \times 1,19} + \sum_i + \sum_{b/2} \approx 0,3$$

Opm.: Waar de lijnen (figuur 5) voor volledig ontwikkelde kavitatie bij kruin ($p_1=p_d$) en kroon ($p_2=p_d$) elkaar snijden zijn de drukken bij kruin en kroon gelijk en de getallen van Thoma gelijk aan 0. De vier lijnen voor één kniehoogte (h) snijden elkaar dus in één punt.

Voor kavitatiegetallen zie 5.3.6.

5.3.5. Golfinvloed

- I. Stel dat er bij extreem verval (benedenwater op N.A.P. -3,9 m) een golfhoogte $H=4,2$ m ($=0,7$ x de waterdiepte) voorkomt. Het bovenwater is vlak. De golfperiode op de Noordzee is $T=8$ s, de bijbehorende golflengte $L = 65$ m (volgens formule (32)). Het golfgetal $\kappa = 2\pi/L = 0,1$, de cirkelfrekwentie $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,785$, de golfamplitude $a = \frac{1}{2} H = 2,1$ m. De hoogte van de uitlaat (afstand vloer tot plafond) $h = 5$ m; dan volgt uit formule (21):

$$\frac{\hat{p}}{\rho g} = 2,3 \text{ mwk (reduktie golfhoogte door uitstroming hevel wordt hier weggelaten).}$$

Omdat $\Delta H = 4,9$ m en $\bar{v}_0 = 6,6$ m/s (zie 4.4.2.) bij $\gamma_0 = 2,2$, dan volgt uit (27) de amplitude van de snelheidsvariatie: $\hat{v} = 0,10$ m/s. De uitgevoerde linearisering in hoofdstuk 3.11. is toegestaan omdat $\hat{v} \ll \bar{v}_0$.

De drukfluktuatie door golven in de hevelknie is $\pm \frac{1}{1} \frac{\hat{p}}{\rho g}$ (zie vergelijking (31)) $= \pm \frac{50}{300} \cdot 2,3 = \pm 0,4$ mwk.

De laagste drukken worden hierdoor (zie ook 4.4.3.) in kruin en kroon -8,72 mwk.

- II. Bij een verval van 2,9 m (bovenwater op N.A.P. -1 m en benedenwater op N.A.P. -3,9 m) en een golf van $H = 4,2$ m, dan wordt $\hat{p}/\rho g = 1,89$ mwk, $\hat{v} = 0,08$ m/s, de kruindruk -8,42 mwk en de kroondruk -9,78 mwk.
- III. Bij een normaal verval van 1 m (bovenwaterstand N.A.P.), en een golfhoogte van 5,6 m wordt: $L = 75$ m, $\kappa = 0,084$, $\omega = 0,785$, $a = 2,8$ m, $\hat{p}/\rho g = 2,20$ mwk, $\bar{v} = 0,09$ m/s, de kruindruk -5,31 mwk en de kroondruk -8,09 mwk.

Opmerking

De hierboven berekende druk- en snelheidsvariaties worden door golven veroorzaakt bij de aangeslagen hevel. De invloed van de op het benedenwater aanwezige golven op de waterstand in het onderbeen is gering; zie hiervoor het rekenvoorbeeld van 3.11.1.

5.3.6. Kavitatie

Bij een bepaald verval zonder golven zijn de kavitatiegetallen bij kruin en kroon

$$\text{I} \quad \Delta H = 4,9 \text{ m, (bovenwaterstand op N.A.P. +1 m):} \quad (50)$$

$$\sigma_1 = \frac{p_1/\rho g - p_d/\rho g}{V_1^2/2g} = \frac{1,68 - 0,24}{4,65} = 0,3 \text{ en } \sigma_2 = 1,2$$

$$\text{II} \quad \Delta H = 2,9 \text{ m, (bovenwaterstand op N.A.P. -1 m):}$$

$$\sigma_1 = 0,6 \text{ en } \sigma_2 = 0,4$$

$$\text{III} \quad \Delta H = 1 \text{ m, (bovenwaterstand op N.A.P.):}$$

$$\sigma_1 = 4,9 \text{ en } \sigma_2 = 8,2$$

Overeenkomstig het in 3.12 gegeven voorbeeld van een schatting van kavitatie-inceptiegetallen, kan berekend worden dat bij maximaal verval de schuifspanning bij de kruin

$$\tau = \frac{0,016}{4} \cdot \frac{10^3}{2} \cdot 9,55^2 = 184 \text{ N/m}^2 \quad (51)$$

$$U_{\#} = 0,43 \text{ m/s} \quad (52)$$

$$U_e = 3,6 \text{ m/s} \quad (54)$$

$$\delta = 14,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (55)$$

$$R_e = \frac{3,6 \times 14,8 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 5,3 \cdot 10^4 \quad (56)$$

Grafiek 1 van figuur 18 geeft voor $k/\delta = 0,15$ een σ_1 0,5 à 0,8.

Grafiek 2 van figuur 18 geeft voor $R_e = 5,3 \cdot 10^4$ een σ_1 0,5 à 1,6.

Dit getallenvoorbeeld moet gezien worden als een toelichting op 3.12; de getallen zijn niet zonder meer bruikbaar voor het hevelontwerp, wel geeft dit een indicatie dat bij grotere vervallen kav. t. tie wel op kan treden.

5.3.7. Pompkapaciteit

Als geen rekening wordt gehouden met de mogelijkheid van gedempt aanslaan (onderdruk in hevel bij afgeslagen toestand) dan treedt het maximale maatgevende luchtvolume (V_0) op, bij de laagste waterstanden waarbij de hevel nog aangeslagen moet kunnen worden:

Bovenwater : N.A.P. -1 m,

Noordzee : N.A.P. -2 m.

Het luchtvolume dat hierbij behoort is $V_0 = 600 \text{ m}^3$ (zie vergl. 15)

Als wordt aangenomen dat het zelf-aanslaand vermogen van de hevel minimaal is dan moet de vakuümpomp de bovenwaterstand tot aan de kroon optillen: over (Hz=) 8,5 m.

De som van de oppervlakte van de waterspiegels in de hevelbenen is gemiddeld $F' = 75 \text{ m}^2$. Bij een atmosferische druk van (N=) 10 mwk zal het produkt van pompkapaciteit (K in m^3/s) en tijd waarin de hevel aanslaat (Tz in s) volgens formule (61b) 1.000 m^3 zijn. Indien we bijvoorbeeld de hevel in acht minuten willen aanslaan is in de meest ongunstige situatie een pompkapaciteit van $2 \text{ m}^3/\text{s}$ vereist.

Opmerkingen

- Overwogen kan worden de vakuümpomp al te starten, voordat het benodigde minimum verval aanwezig is.
- Als vakuümpomp kan bijvoorbeeld een vloeistofringpomp toegepast worden. De in de handel zijnde standaard vloeistofringpompen hebben een maximum capaciteit van $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Het hoogvakuüm type heeft een kompressie tot 0,02, het middenvakuüm type tot 0,1.

6. Benodigde gegevens

Een aantal aspecten die bij het hevelontwerp van belang zijn, kunnen verder uitgewerkt worden (zie o.a. Appendix I en II).

Bij deze uitwerking zal soms een statistische aanpak nodig zijn. De uitwerking hangt o.a. af van de vorm waarin de benodigde gegevens beschikbaar zijn. In de hieronder volgende opsomming worden een aantal van de hierboven bedoelde aspecten en de bijbehorende gegevens (+ vorm) genoemd.

aspecten	benodigde gegevens
- keuze heveltype, hevellengete, hoogte/breedte verhouding knie; - plaats hevelknie; - kruinpeil, zoutindringing; - druk, golven, hevelkapaciteit; - kavitatie, maximaal debiet, bodembescherming; - in- en uitlaatplafondpeilen, plafondpeil tussen hiel en uitlaat;	- beschikbare ruimte, damprofiel, bodemkonfiguratie, globale waterstanden en gewenste debiet; - plaats evt. obstakels; - overschrijdingslijnen van hoge waterstanden en bijbehorende golven (gekoppelde relatie) op benedenwater (in keren per jaar); - frekwentie verdelingen van waterstanden en golven op boven- en benedenwater, definiëren van maximaal maatgevend verval; - onderschrijdingslijnen van waterstanden en overschrijdingslijnen van bijbehorende golven op benedenwater; - laagste boven- en benedenwaterstanden waarbij de hevel nog aangeslagen moet kunnen worden;

7. LITERATUUR

- [1] Waterloopkundig Laboratorium
"Hevels Waterwerk Berenplaat"
Rapport M 716, maart 1962.

- [2] Waterloopkundig Laboratorium
"Spui-inrichting Twentekanaal te Eefde"
Rapport M 897, februari 1969

- [3] N.S. Govinda Rao
Design of Siphons
Central Board of Irrigation and Power
Publication no. 59, September 1956.

- [4] J.A.Charlton
"Selfpriming spillway syphons; an appraisal"
British Hydromechanics Research Association
Publication SP. 75, April 1962.

- [5] J. Valembois
"Abaque pour le calcul des caractéristiques de l'écoulement dans
la section de gorge d'un siphon"
La Houille Blanche
nr. 1, 1962.

- [6] K.J. Zanker
"Investigation of the performance of high syphons"
British Hydromechanics Research Association
Publication RR 965.

- [7] A.J. Harrison
"Model study of siphon vibrations"
I.A.H.R. Vol. 4, Paper 4, 1965.

- [8] F. Langeweg
"De hydraulische randvoorwaarden t.b.v. de lozingsmiddelen in
de Oosterscheldedam"
Nota W-72.049, april 1972.

- [9] S. Leliavsky
Irrigation and Hydraulic Design
Vol. II, blz. 358-372.

- [10] G.A. Taylor, A.G. Littlejohn and J. Allen
A Scale-Model Investigation of the Characteristics of a
Siphon Spillway Designed to Prime and De-prime Rapidly.
Journal of the Institution of Water Engineers
Vol. 15. 1961.

- [11] A.H. Gibson, T.H. Aspey and F. Tattersall
"Experiments on Siphon Spillways"
PICE Vol. 231, 1931.

- [12] R.B. Whittington and H.M.A. Kamil
Siphons: Some Scale-Effects in Models
PASCE Vol. 98, no. HY1, Jan. 1972.

- [13] G. Benfratello
Sulla similitudine idrodinamica nel funzionamento dei
sifoni autoinnescantisi
N 153, 1958.

- [14] J.A. Charlton
"The design of air-controlled spillway siphons"
Journal J.W.E.
Vol. 25, 1971.

- [15] L.F. Moody
Friction factors for pipes
Trans A.S.M.E.
Vol. 66, 1944.

- [16] T. Knapp, J.W. Daily and F.G. Hammit
Cavitation, 1970.

- [17] C.E. Wooldrigde en R.J. Muzzy
Boundary layer turbulence measurements with mass addition
and combustion
A.J.A.A. Journal 4 nr. 11, November 1966.

- [18] A. Linford
The application of models to hydraulic engineering
Part 5: self-priming siphon spillways
Water and water engineering, January 1966.
- [19] J.A. Charlton
"The priming of pump, siphonic discharge lines"
Journal of the Institution of Water Engineers
Vol. 26, no. 1, februari 1972.
- [20] D.W. Moore
"The Velocity of rise of distorted gas bubbles in a liquid
of small viscosity"
J. Fluid Mech.
Vol. 23, part 4, jan. 1965.
- [21] J.A. Charlton
Model tests of Stourhead Siphon Spillway
The British Hydromechanics Research Association
RR 737 June 1962.

APPENDIX I

Numeriek oplossen van (37)

Vergl. (37) geeft als oplossing: $y(t)$ de waterstand in het onderbeen van de hevel als functie van de tijd.

De debietvariatie in de tijd kan geschreven worden als $\Delta q_z = m(y(t) - y_1)^{3/2} - m(\bar{y} - y_1)^{3/2}$ terwijl de invloed van de korte golven (zeegang en deining) op het ingedrongen zeewatervolume wordt gegeven door

$$\Delta V_z = \int \Delta q_z \cdot \Delta t$$

Het oplossen van (37) kan volgens het volgende schema geschieden (waarbij gebruik wordt gemaakt van (21))

$$\begin{aligned} \dot{y}[i+1] &:= \dot{y}[i] + \ddot{y}[i] \cdot \Delta t \\ y[i+1] &:= y[i] + \frac{\dot{y}[i+1] + \dot{y}[i]}{2} \Delta t \\ \ddot{y}[i+1] &:= -\frac{3}{2} \cdot \frac{m}{F'''} (y[i+1] - y_1)^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{y}[i+1] + \\ &\quad \frac{gF}{l'F'''} (y[i+1] - \bar{y} - \frac{1}{\kappa h} \frac{\sinh \kappa h}{\cosh \kappa D} \cdot \frac{H}{2} \sin \omega t[i+1]) \end{aligned}$$

Als bekend zijn $\dot{y}[0]$, $\ddot{y}[0]$, Δt , $y[0]$, de golfhoogte H , de golfrequentie ω , de gemiddelde waterstand $\bar{y}$ en een aantal coëfficiënten die van de konstruktie (Δvorm) afhangen (m , F , F''' , l' , h , y_1 en D), kan de volgende werkwijze worden toegepast:

$$\begin{aligned} &\text{schat } \dot{y}[0] \text{ en } \ddot{y}[0] \\ &\text{bereken } \dot{y}[1], y[1] \text{ en } \ddot{y}[1] \quad (i=0) \\ &\text{bereken } \dot{y}[2] \text{ m.b.v. } \dot{y}[1] \text{ en } \ddot{y}[1] \quad (i=1) \\ &\text{enz.} \end{aligned}$$

Afhankelijk van de nauwkeurigheid van de schatting van $\dot{y}[0]$ en $\ddot{y}[0]$ moet dit proces gedurende een aantal perioden herhaald worden om een goede oplossing te krijgen.

Bovenstaande geldt voor $y > y_1$

*Opm. Als op een bepaald tijdstip $y \leq y_1$, dan kan met voorgaande vergelijking gestart worden op de minimale waterstand, dus als $t=3/4T$. Zodra y groter wordt dan y_1 , kan het differentieschema met de laatst berekende waarde gestart worden. Eén periode doorekenen is dan voldoende.

Voor $y \leq y_1$ geldt de oplossing volgens vergelijking (42)(waarin (21) is gesubstitueerd):

$$y = \bar{y} + \frac{1}{\kappa h} \cdot \frac{\sinh \kappa h}{\cosh \kappa D} \cdot \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\frac{F''_{11} \omega^2}{Fg} + 1} \right) \sin \omega t \quad (42a)$$

$$\text{Als } \Delta V_z^{\#} = \frac{\Delta V_z}{\frac{1}{2} m \left(\frac{H}{2} \right)^{3/2}} \text{ en } y^{\#} = \frac{y_1 - \bar{y}}{H/2}$$

dan kan de variatie van het zeewatervolume per golf geschreven worden als

$$\Delta V_z^{\#} = \sum_{i=1}^{T/\Delta t} \left[\left(\frac{y-y_1}{H/2} \right)^{3/2} - (-y^{\#})^{3/2} \right] \Delta t$$

met $y^{\#} \leq 0$

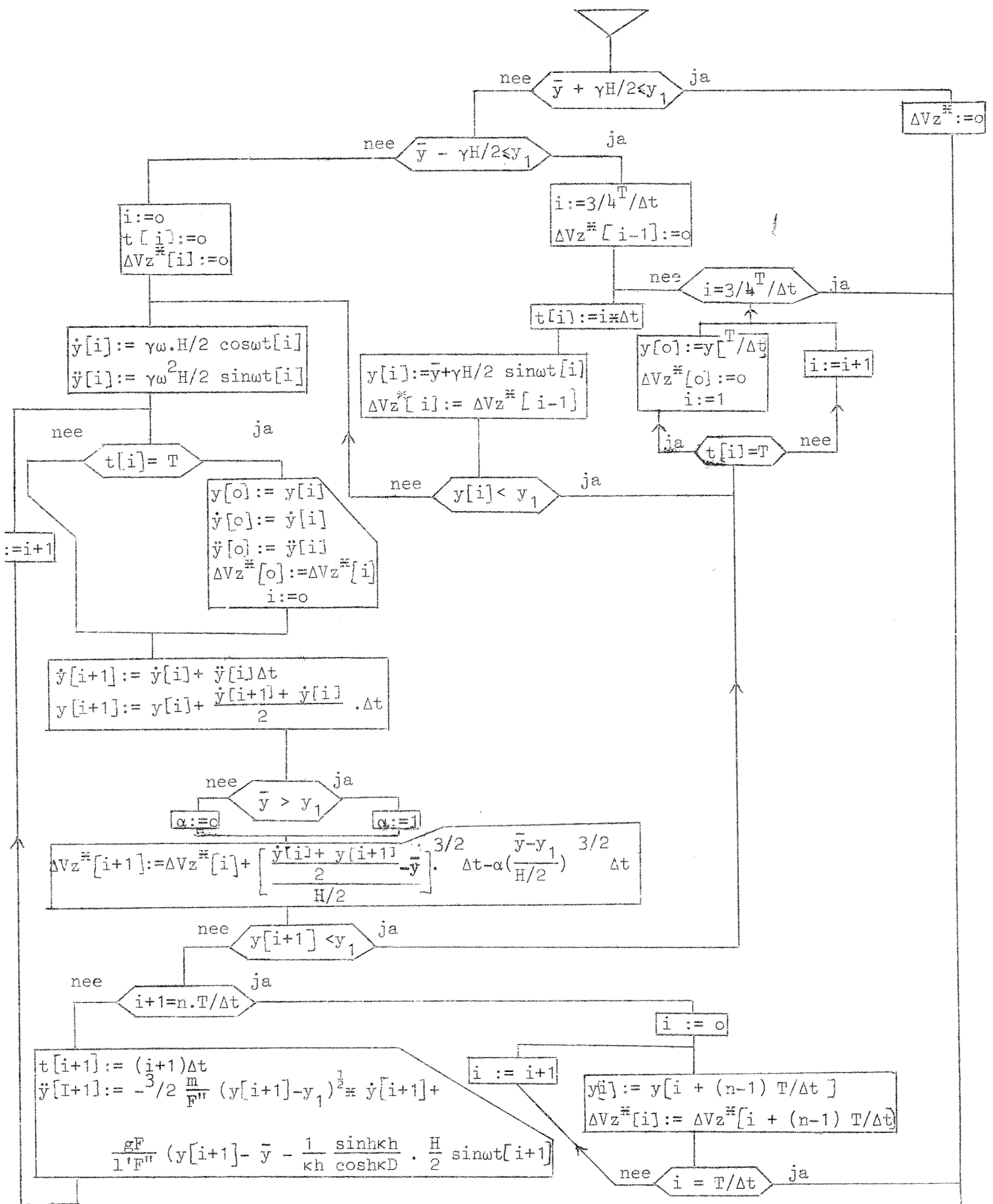
voor $y^{\#} > 0$

$$\Delta V_z^{\#} = \sum_{i=1}^{T/\Delta t} \left(\frac{y-y_1}{H/2} \right)^{3/2} \Delta t \text{ met } y > y_1$$

$$\Delta V_z^{\#} = 0 \text{ voor } y \leq y_1$$

Als $\gamma = \frac{1}{\kappa h} \frac{\sinh \kappa h}{\cosh \kappa D} \left(\frac{1}{\frac{F''_{11} \omega^2}{Fg} + 1} \right)$, kan het volgende stroomschema worden opgezet voor het berekenen van $\Delta V_z^{\#}$ per periode (v.d. korte golf).

Bij het uitwerken van het volgende stroomschema moet ervoor gezorgd worden dat de berekening afbreekt (vergezeld door een relevante melding) op het moment dat de golftop de hevelkroon raakt.



n = aantal keren dat een golflengte door-
gerekend wordt (om invloed begin-
schatting te wissen)

PLOT $y[i]$ versus $t[i]$
 $\Delta Vz^{\#} = \dots m^3/golf$

APPENDIX II

Numeriek oplossen van (49)

In deze appendix is het getij met formule (47) benaderd, een nauwkeuriger benadering bijv. het puntsgewijs inlezen van een willekeurige getijkromme verandert het principe van de berekening niet.

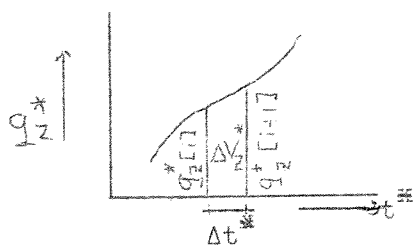
De berekening van het volume zeewater dat per getij en per m' hevelbreedte via de hevel binnendringt (geen korte golven) kan als volgt worden opgezet.

Als we (49) in dimensieloze vorm willen schrijven, ligt het voor de hand, als parameter $y^{\#} = \frac{2}{H} (y_1 - \bar{y})$ te nemen. Kiezen we voor $V_z^{\#} = \frac{V_z}{mT(\frac{H}{2})^{3/2}}$,

voor $t^{\#} = t/T$ en voor $q_z^{\#} = (-y^{\#} + \sin 2\pi t^{\#})^{3/2}$, dan kan (49) geschreven worden als

$$V_z^{\#} = 2 \int_{\frac{1}{2\pi} \arcsin y^{\#}}^{\frac{1}{4}} (\sin 2\pi t^{\#} - y^{\#})^{3/2} dt^{\#}$$

Met formule (34) kan uit de getijkromme (y - t grafiek) de $q_z^{\#}$ - $t^{\#}$ grafiek worden bepaald.



$$\Delta V_z^{\#} = \frac{q_z^{\#}[i+1] + q_z^{\#}[i]}{2} \Delta t^{\#}$$

$$V_z^{\#}[i+1] := V_z^{\#}[i] + \Delta V_z^{\#} \text{ dus}$$

$$V_z^{\#}[i+1] := V_z^{\#}[i] + \frac{1}{2}(q_z^{\#}[i] + q_z^{\#}[i+1]) \Delta t^{\#}$$

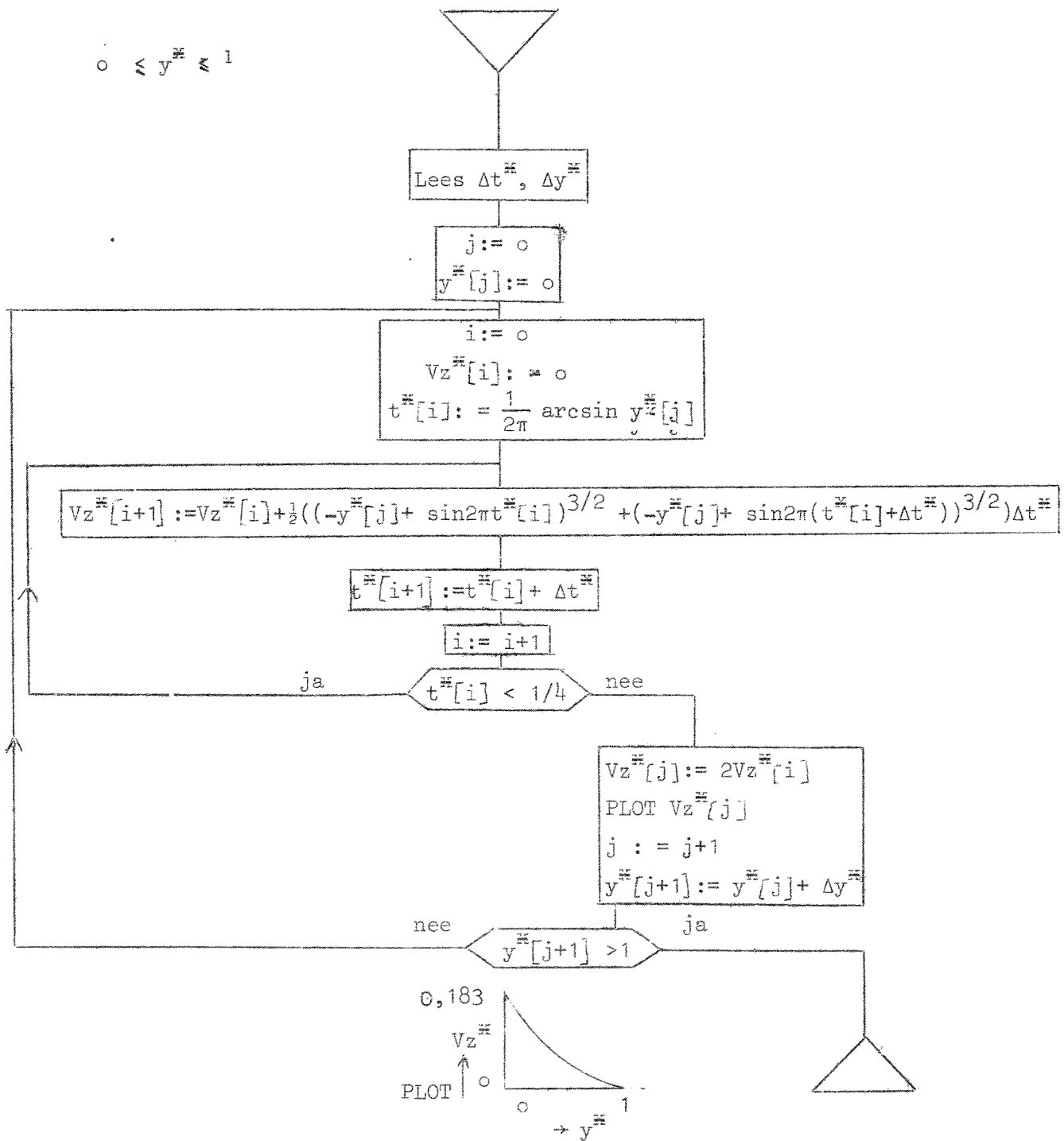
$$V_z^{\#}[i+1] := V_z^{\#}[i] + \frac{1}{2}((-y^{\#} + \sin 2\pi t^{\#}[i])^{3/2} + (-y^{\#} + \sin 2\pi t^{\#}[i+1])^{3/2}) \Delta t^{\#}$$

Opm.: - Bij bepaalde getij-golfhoogten (H) en kruinhoogten (y_1) anders

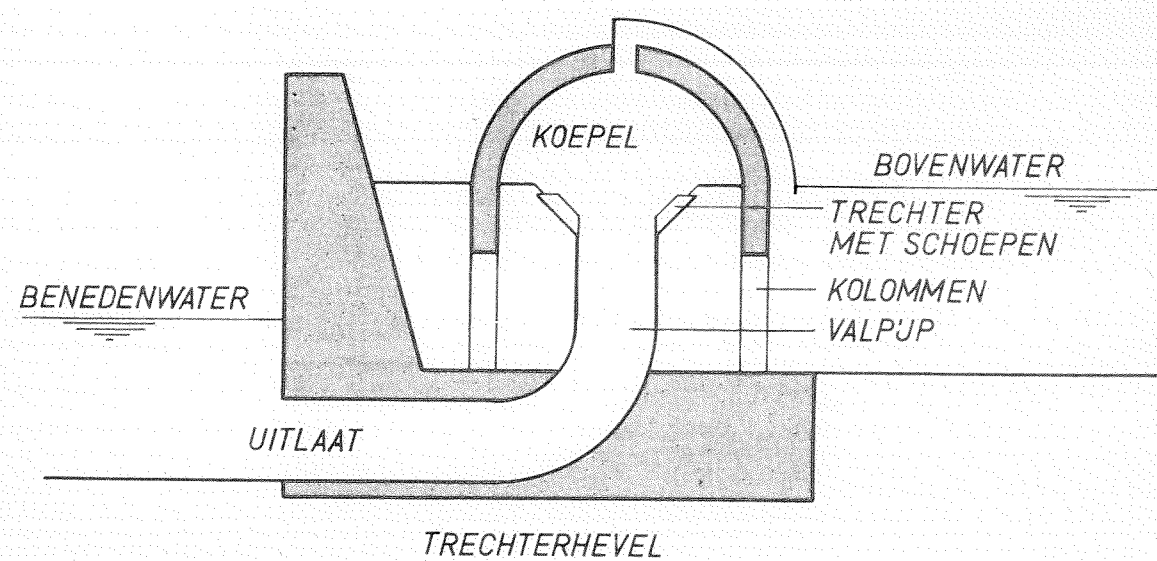
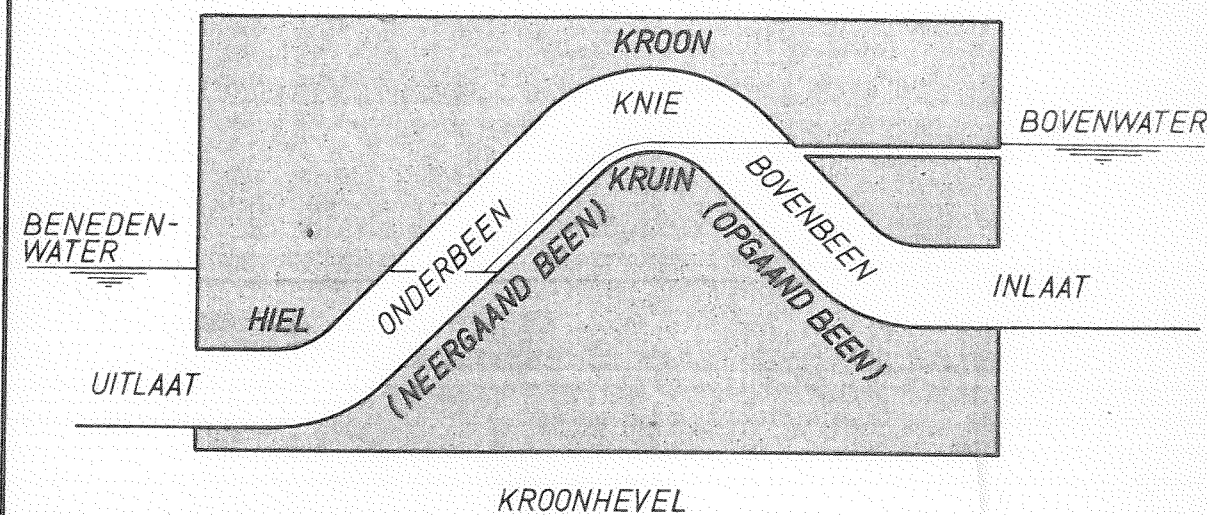
gezegd bij variërende $y^{\#}$ kan het volume ingedrongen zeewater $V_z^{\#}$ hiermee bepaald worden.

- Bij het uitwerken van het volgende stroomschema (tot een komputerprogramma) moet er om gedacht worden de berekening af te breken (waarvan een relevante melding verschijnt) voor het geval dat de waterstand boven de hevelkroon stijgt, of $\bar{y} + \frac{H}{2} > y_1 + h$, of als $y^{\#} < 1 - h^{\#}$ met $h^{\#} = 2h/H$
- De berekening loopt van $y^{\#} = 0$, als de gemiddelde waterstand gelijk is aan het kruinpeil tot aan $y^{\#} = 1$ als de hoogste waterstand gelijk is aan het kruinpeil.

$0 \leq y^{\#} \leq 1$



Opmerking array-grootte van $V_z^{\#}$ ($0 : \frac{1}{\Delta t^{\#}} \left(\frac{1}{4} - \frac{\arcsin y^{\#}[i]}{2\pi} \right)$) of ($0 : 1/\Delta y^{\#}$)
 en van $y^{\#}$ ($0 : 1/\Delta y^{\#}$)



SYM- BOOL	OMSCHRIJVING	DIMEN- SIE	SYM- BOOL	OMSCHRIJVING	DIMEN- SIE
h	HOOGTE VAN DE HEVEL = $f(x)$	m	F	OPP. - HEVELDOORSNEDE: $b \times h$	m^2
b	HEVELBREEDTE	m	L	GOLFLENGTE	m
l	HEVELLENGTE	m	D	WATERDIEPTE	m
l'	AFSTAND TUSSEN UITLAAT EN KNIE	m	x, y	PLAATSKOÖRD.	m
l''	AFSTAND TUSSEN INLAAT EN KNIE	m	c, x, C	KONSTANTEN	—
R_h	HYDRAULISCHE STRAAL	m	σ	GETAL VAN THOMA $\frac{p-p_d}{\frac{1}{2}\rho v^2}$	—
C	GETAL VAN CHEZY	$m^{1/2} s^{-1}$	σ_i	KAVITATIE INCEPTIE GETAL	—
λ	$8g/C^2$ WEERSTANDSKOËFF.	—	N	ATMOSFERISCHE DRUK	m
ΔH	VERVAL	m	c	KOMPRESSIEVERHOUDING	—
ξ_0	TOTALE VERLIESKOËFF.	—	K	KAPACITEIT VAKUÛMPOMP	$m^3 s^{-1}$
ξ_i	INLAAT - VERLIESKOËFF.	—	V_0	LUCHTVOLUME KNIE BIJ 1 ATO	m^3
ξ_w	$\lambda \cdot l / 4 R_h$ WERJINGSVERLIESKOËFF.	—	V	MOMENTAAN LUCHTVOLUME	m^3
ξ_b	BOCHT - VERLIESKOËFF.	—	F''	OPP. WATERSPIEGEL ONDERBEEN	m^2
ξ_u	UITLAAT - VERLIESKOËFF.	—	F'	OPP. HOR. DSN. VAN ONDER - PLUS BOVENBEEN	m^2
v	WATERSNELHEID	$m s^{-1}$	H_z	WATERHOOGTE T.O.V. BOVENWATER WAARBU HEVEL ZELF AANSLAAT	m
$\bar{v}$	GEMIDDELDE WATERSNELHEID	$m s^{-1}$	T_z	TJDSDUUR TUSSEN AANSLAAN POMP EN ZELF AANSLAAN HEVEL	s
$\bar{v}_b$	STUGSNELHEID LUCHTBELLEN	$m s^{-1}$	k	WANDRUWHEID	m
Q	DEBIET	$m^3 s^{-1}$	τ	SCHUIFSPANNING	$N m^{-2}$
q	DEBIET PER BREEDTE EENHEID	$m^2 s^{-1}$	u_*	SCHUIFSPANNINGSSNELHEID	$m s^{-1}$
p	WATERDRUK	$N m^{-2}$	δ	GRENSLAAGDIKTE	m
p_d	DAMPDRUK	$N m^{-2}$	ν	KINEMATISCHE VISKOSITEIT	$m^2 s^{-1}$
ρ	DICHTHEID VAN WATER	$kg m^{-3}$	Re	GETAL VAN REYNOLDS $\frac{vD}{\nu}$	—
ρ_l	DICHTHEID VAN LUCHT	$kg m^{-3}$	α	KLEPSTAND LUCHTINLAAT	RAD.
g	ZWAARTEKRACHT - VERSNELLING	$m s^{-2}$	A	EVENREDIGHEIDSKONSTANTE	—
H_e	ENERGIEHOOGTE	m	C_D	WEERSTANDSKOËFFICIËNT	—
R_1	AFRONDINGSSTRAAL KRUIN	m	y_a	BENEDENWATERSTAND	m
R_2	AFRONDINGSSTRAAL KROON	m	y_b	BOVENWATERSTAND	m
K	KONSTANTE	—	y_1	KRUINPEIL	m
p_n	PIËZOMETRISCH NIVEAU	m	y_2	KROONPEIL	m
ϕ	SNELHEIDSPOTENTIAL GOLF	$m^2 s^{-1}$	V_z	VOLUME INDRINGEND ZEE-WATER / m' HEVELBREEDTE	m^2
t	TJD	s	q_z	DEBIET INDRINGEND ZEEWATER	$m^2 s^{-1}$
ω	CIRKELFREKWENTIE GOLF $\frac{2\pi}{T}$	s^{-1}			
a	GOLFAMPLITUDE $\frac{1}{2} H$	m			
x	GOLFGETAL $\frac{2\pi}{L}$	m^{-1}			
T	GOLFPERIODE	s			
H	GOLFHOOGTE	m			

DEFINITIES EN SYMBOLEN

J.Z.

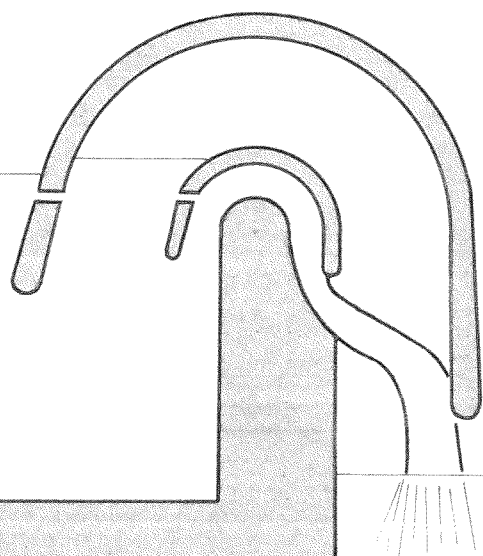
A3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 - 1001

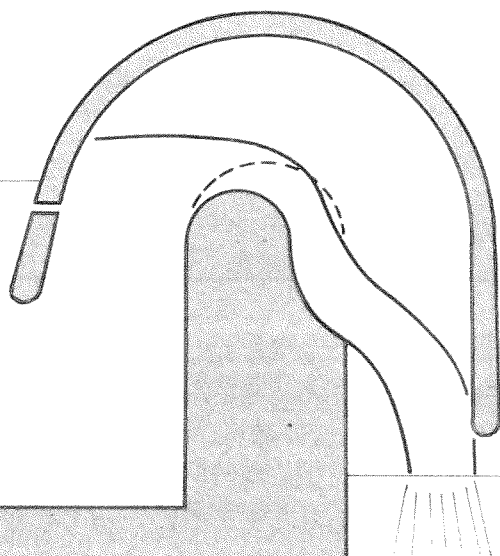
FIG.1

A



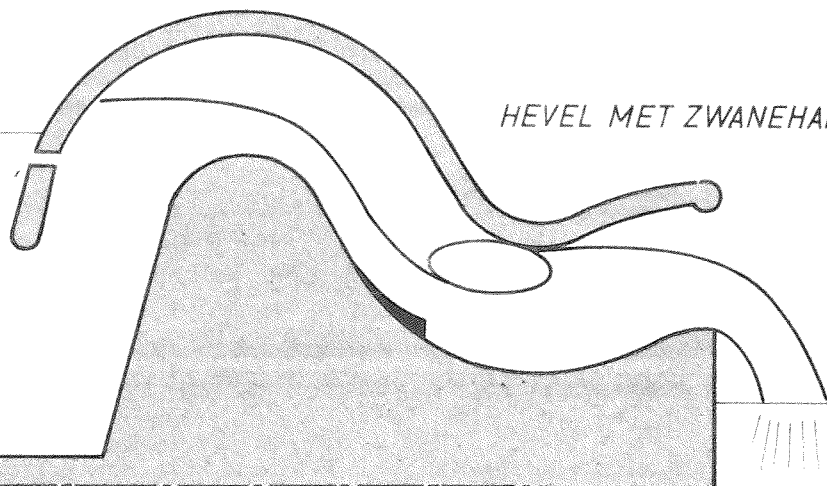
HEVEL MET
BABY - HEVEL

B



HEVEL MET SCHANS

C



HEVEL MET ZWANEHALS

ZELF - AANSLAANDE HEVELS
MET VRIJE UITLAAT

j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 - 1002

FIG. 2



MAATGEVEND PEIL VOOR HEVELDEBIET



STUW
(VERDRONKEN UITLAAT)



WATERSLOT
(VERDRONKEN UITLAAT)



VRJE UITLAAT

UITLAATKONSTRUKTIES

j.z.

A4



OVER — EN ONDERSCHRIJDPERCENTAGE (KEREN/JAAR)

N.A.P.

WATERSTAND (m)

WATERSTANDEN NOORDZEE VOOR OOSTERSCHELDE-DAM

ZIE [8]

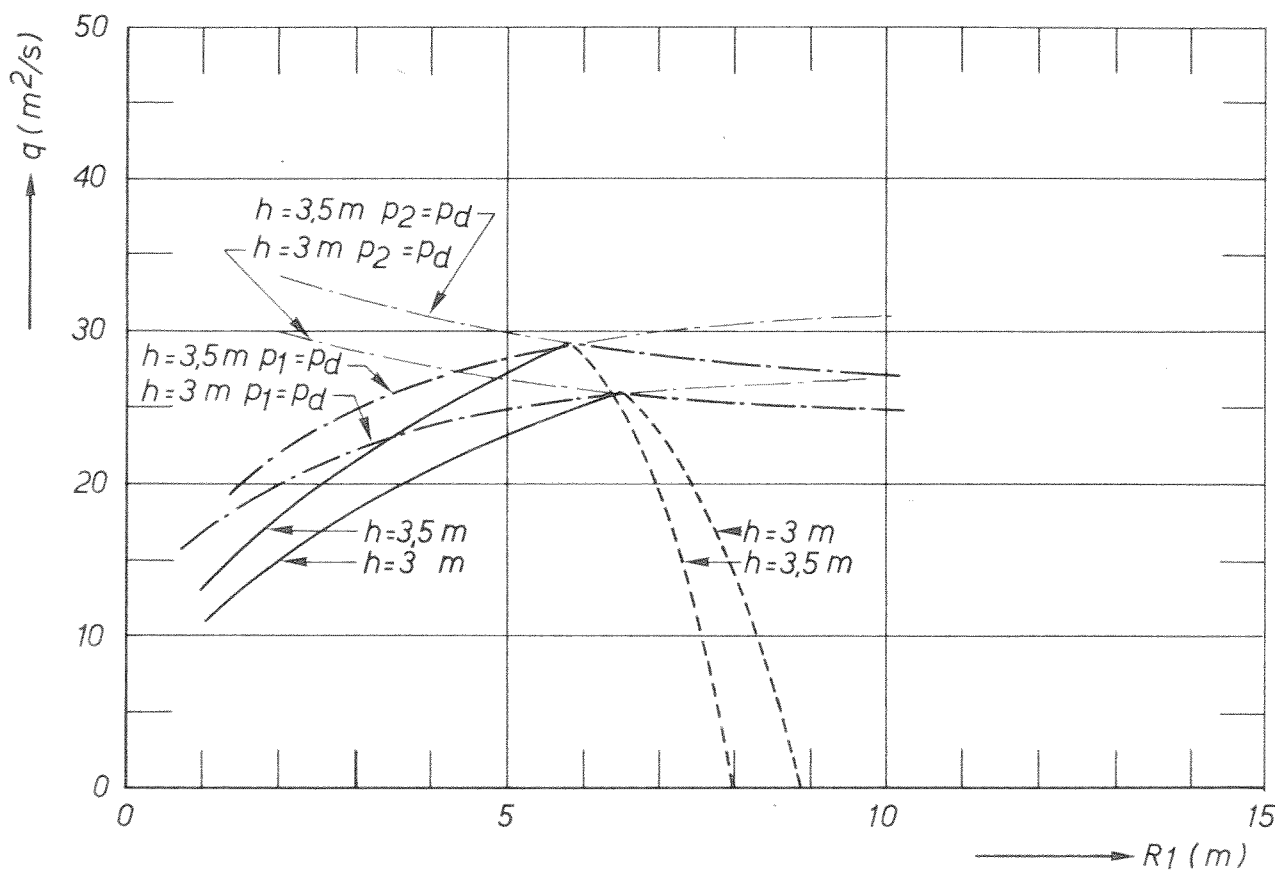
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 -

FIG. 4



————— A GELUKE DRUKKEN KRITERIUM

$$q = (R_1 + h) R_1 \sqrt{\frac{g}{R_1 + \frac{1}{2}h}} \ln \left(\frac{R_1 + h}{R_1} \right)$$

----- B KAVITATIE KRITERIUM

(GETEKEND VOOR $y_b - y_1 - \frac{p_d}{\rho g} = 6,76$ EN $\frac{\lambda l''}{4Rh} + \xi i + \xi \frac{b}{2} = 0,3$; ZIE 5.3.4)

$$R_1 = \sqrt[3]{1 + \frac{h}{y_b - y_1 - h - \frac{p_d}{\rho g} - \left(\frac{\lambda l''}{4Rh} + \xi i + \xi \frac{b}{2} \right) \frac{q^2}{2gh^2}} - 1}$$

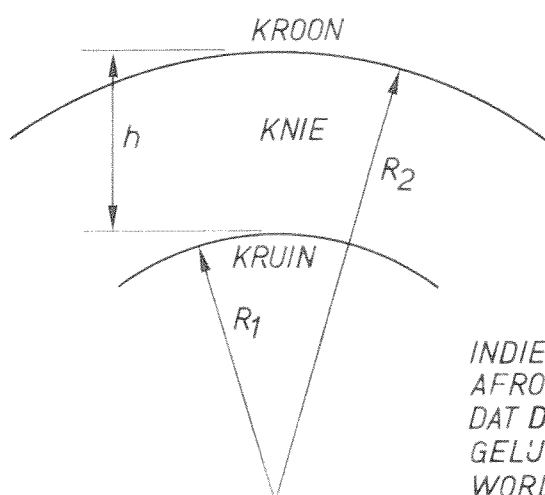
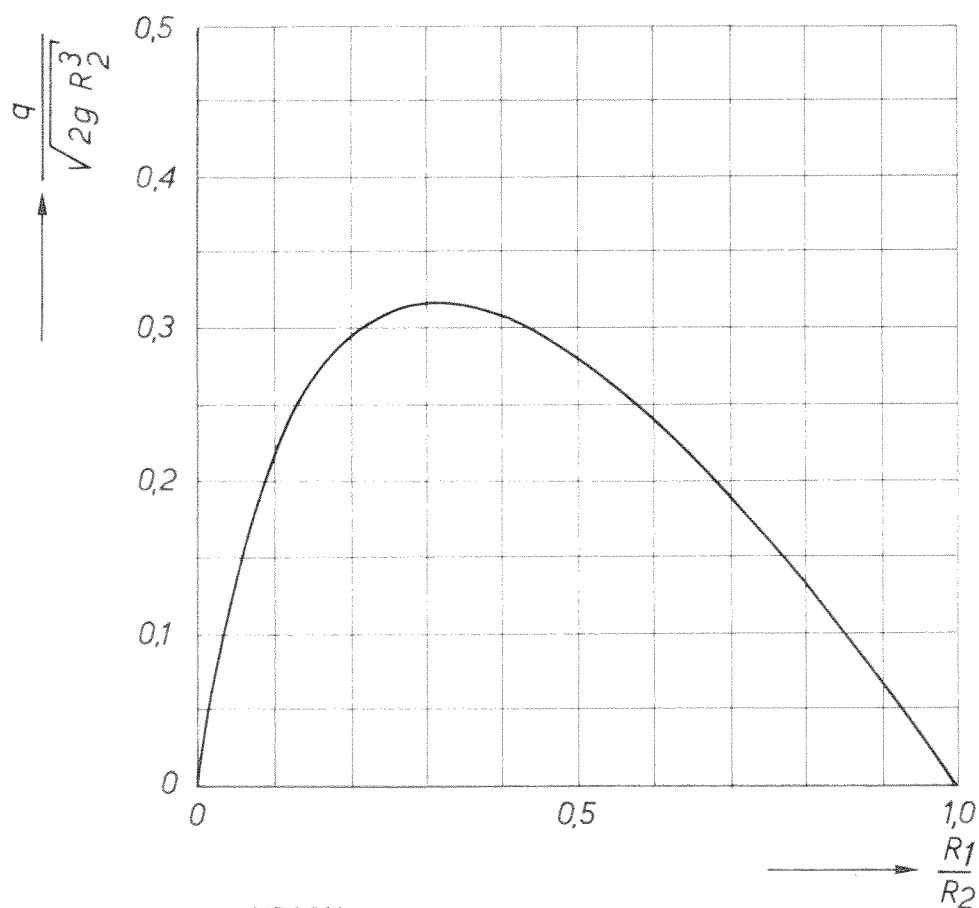
----- A EN B GELDEN ZOLANG GEEN VOLLEDIG ONTWIKKELDE KAVITATIE BIJ KROON OF KRUIN VOORKOMT, OF $p_{1,2} - p_d > 0$, OF

$$q < \sqrt{\frac{(y_b - y_{1,2} - p_d / \rho g) 2gh^2}{\frac{\lambda l''}{4Rh} + \xi i + \xi \frac{b}{2} + \frac{1}{(R_{1,2}/h)^2 \{\ln R_2/R_1\}^2}}}$$

AFRONDINGSSTRAAL VAN DE KRUIN (R_1) ALS
FUNKTIE VAN HET DEBIET (q)
(KRITERIA A EN B)

j.z.

A4

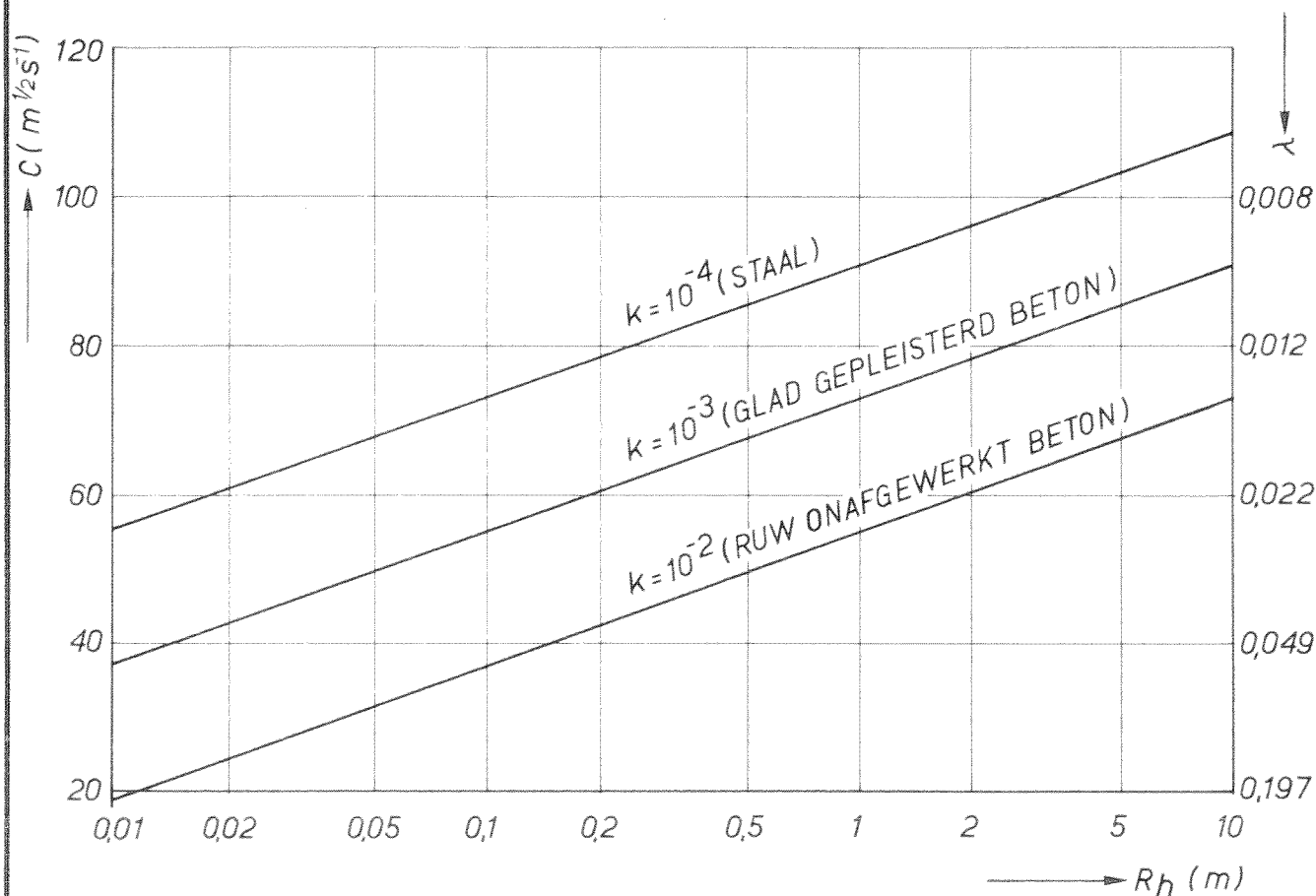


INDIEN BIJ EEN BEPAALD DEBIET DE AFRONDINGSSTRALEN ZO GEKOZEN WORDEN, DAT DE DRUKKEN BIJ KRUIN EN KROON GELIJK ZIJN, KAN DE VOLGENDE RELATIE WORDEN AFGELEID:

$$\frac{q}{\sqrt{2g} R_2^3/2} = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{1}{1 + R_1/R_2}} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (5b)$$

(KRITERIUM A)

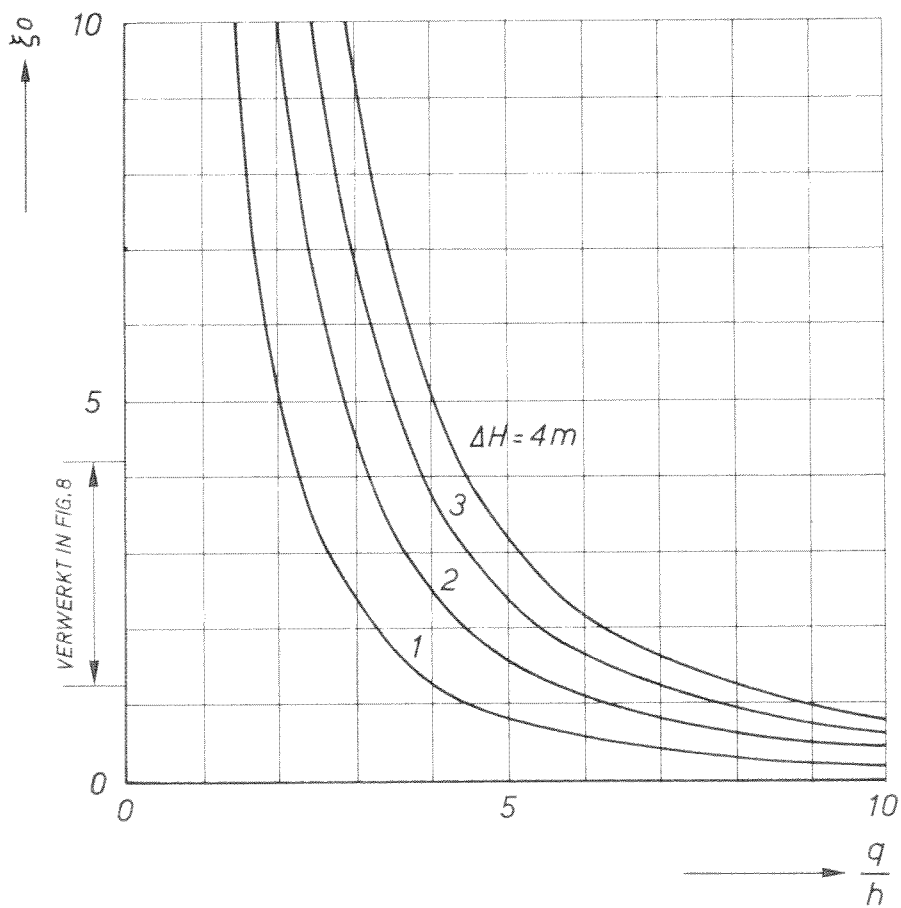
AFRONDINGSSTRAAL HEVELKNIE ALS FUNKTIE VAN HET DEBIET		j.z.
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R. 806 -	FIG. 5b



$$C = 18 \log \frac{12 R_h}{k} \quad \lambda = \frac{89}{C^2}$$

$$\Delta H = \frac{\lambda \cdot l}{4 R_h} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

WEERSTANDKOEFFICIËNTEN (VOOR EEN EENPARIGE BEWEGING IN EEN HYDRAULISCH RUWE SITUATIE)		j. z.
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R.806 -	FIG. 6



$$\Delta H = \frac{\xi_0}{2g} \cdot q^2 / h^2$$

DEBIET ALS FUNKTIE VAN DE VERLIESKOËFFICIËNT

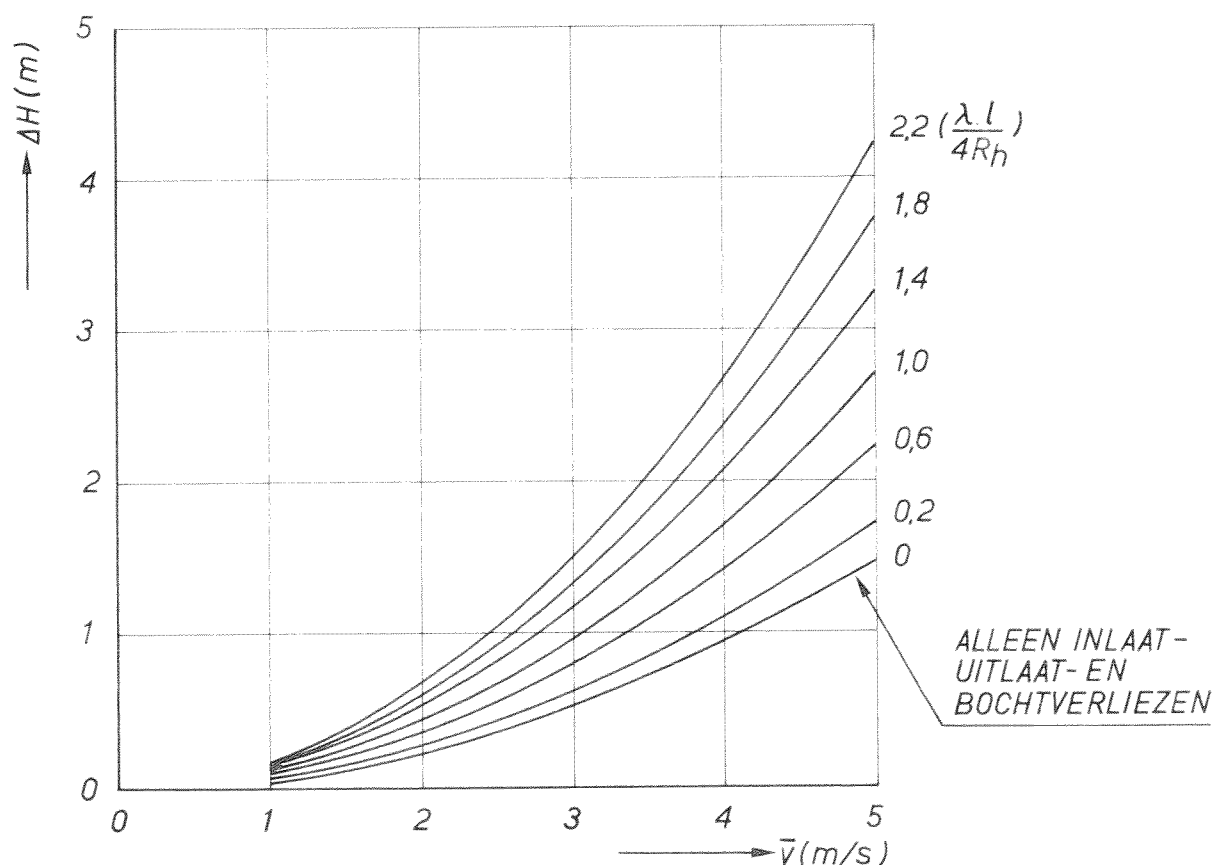
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 -

FIG. 7



ΔH = Verval

ξ_o = TOTALE VERLIESKOEFFICIENT (= $\xi_i + \xi_w + \xi_b + \xi_u$)

ξ_i = INLAATVERLIEZEN

ξ_w = WRUVINGSVERLIEZEN (= $\frac{\lambda \cdot l}{4R_h}$)

ξ_b = BOCHTVERLIEZEN

ξ_u = UITLAATVERLIEZEN

λ = WRUVINGSKOEFFICIENT

l = HEVELLENGTE

R_h = HYDRAULISCHE STRAAL

v = WATERSNELHEID

VOOR $\xi_i + \xi_b + \xi_u \approx 1,2$ GELDT .

$$\Delta H = \left\{ \frac{\lambda \cdot l}{4R_h} + 1,2 \right\} \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

WATERSNELHEDEN ALS FUNKTIE VAN HET VERVAL
(VOORBEELD SCHETSONTWERP)

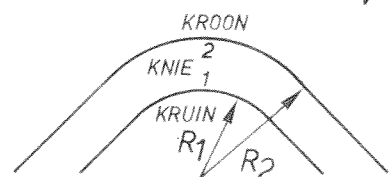
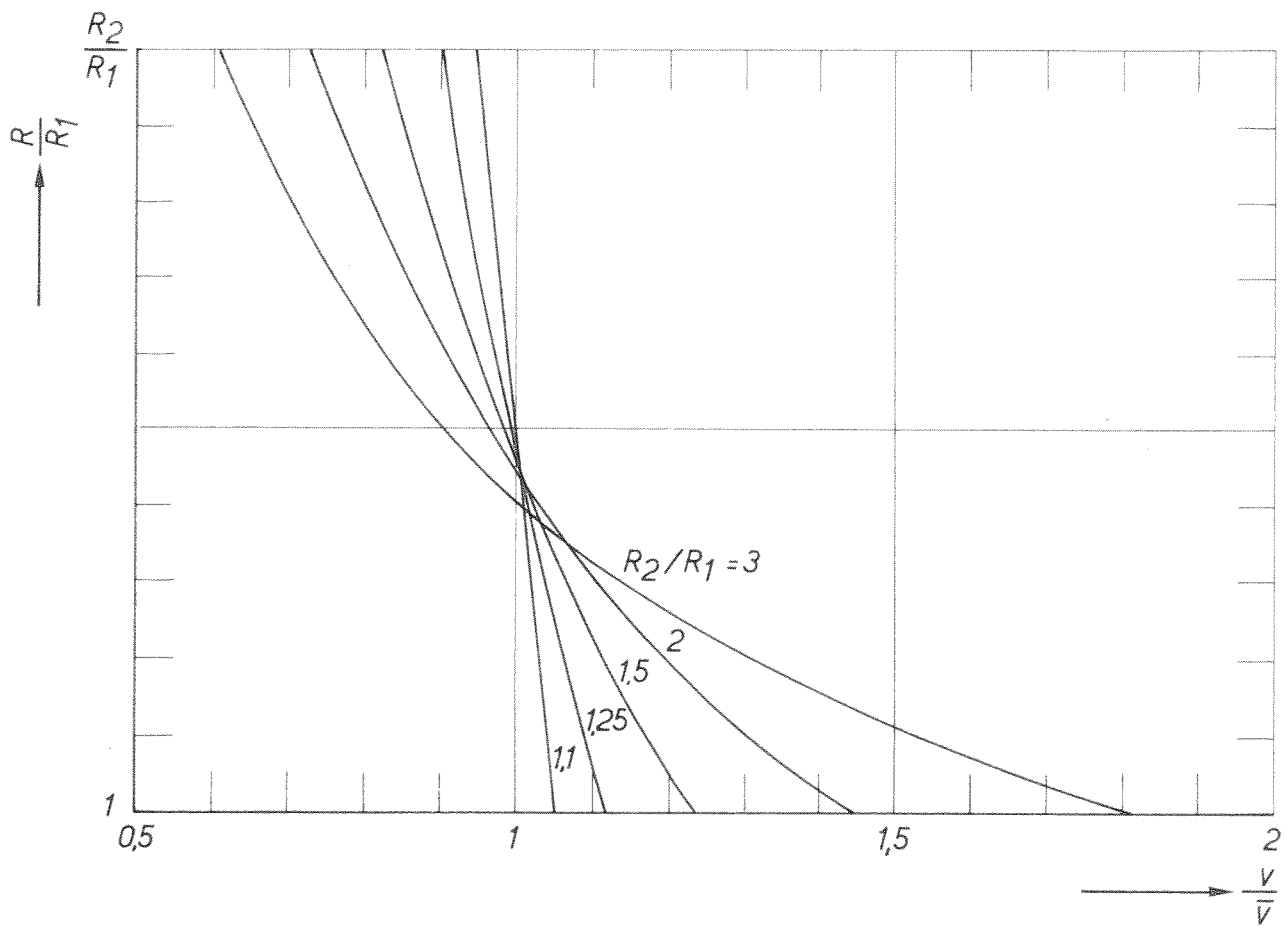
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 -

FIG.8



$R_2 - R_1$ = KNIEHOOGTE

R_2 = AFRONDINGSSTRAAL VAN DE KROON

R_1 = AFRONDINGSSTRAAL VAN DE KRUIN

v = HORIZONTALE WATERSNELHEID OVER DE VERTIKAAL
(TUSSEN PUNT 1 EN 2, ZIE SCHETS)

$\bar{v}$ = GEMIDDELTE WATERSNELHEID

INDIEN DE KROMMING VAN KRUIN EN KROON UIT KONCENTRISCHE
CIRKELS BESTAAT GELDT VOOR EEN POTENTIAAL STROOM:

$$\frac{R}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times \frac{1}{\ln(R_2/R_1)} \times \frac{1}{v/\bar{v}}$$

SNELHEIDSVERDELING IN HEVELKNIE

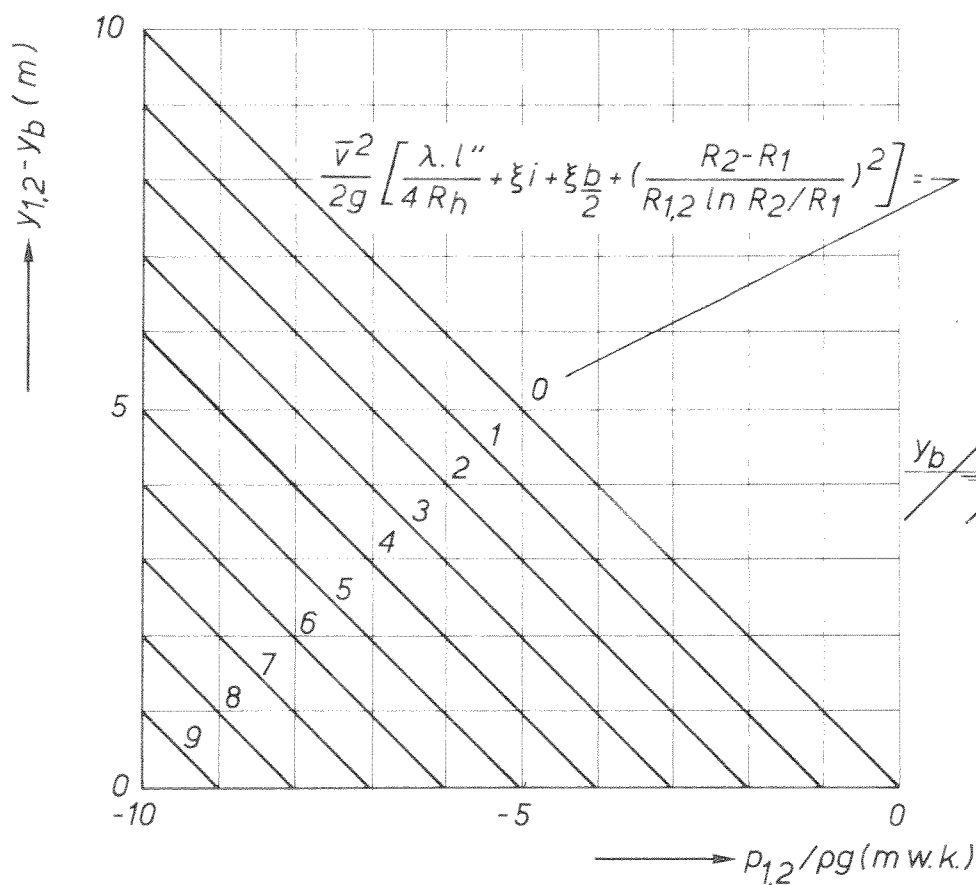
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 - 1010

FIG. 9



$$\frac{p_{1,2}}{\rho g} = y_b - y_{1,2} - \frac{\bar{v}^2}{2g} \left[\frac{\lambda \cdot l''}{4R_h} + \xi_i + \xi_b + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_{1,2} \ln R_2 / R_1} \right)^2 \right]$$

$y_{1,2} - y_b$ = HOOGTEVERSCHIL TUSSEN RESP HET KRUIN - EN KROONPEIL EN DE BOVENWATERSTAND IN m

$\frac{p_{1,2}}{\rho g}$ = DRUK BIJ RESP. KRUIN EN KROON IN m w.k.

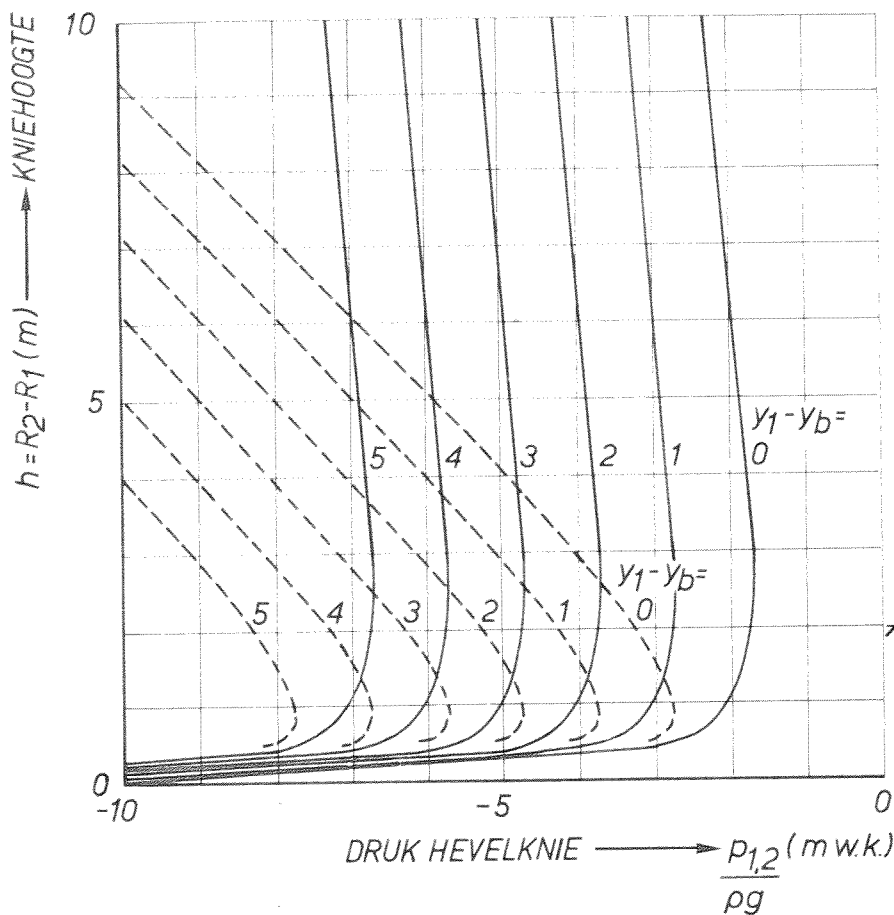
$\frac{\bar{v}^2}{2g} \left[\frac{\lambda \cdot l''}{4R_h} + \xi_i + \xi_b \right]$ = ENERGIEVERLIES TUSSEN KNIE EN INLAAT

$\frac{\bar{v}^2}{2g} \left(\frac{R_2 - R_1}{R_{1,2} \ln R_2 / R_1} \right)^2$ = SNELHEIDSHOOGTE IN RESP. KRUIN EN KROON

DRUK HEVELKNIE ALS FUNKTIE VAN DE HOOGTE VAN KRUIN EN KROON BOVEN DE BOVENWATERSTAND (BIJ EEN BEPAALD DEBIET)

j.z.

A4



VOOR

$$\frac{\bar{v}^2}{2g} = 1 \text{ m} ; \xi_i + \xi_b = 0,1 ; \frac{\lambda l''}{4R_h} = \frac{0,8}{h} = \text{EN } R_1 = 3,5 \text{ m}$$

GAAT DE VERGELIJING

$$\frac{p_{1,2}}{\rho g} = y_b - y_{1,2} - \frac{\bar{v}^2}{2g} \left[\frac{\lambda l''}{4R_h} + \xi_i + \xi_b + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_{1,2} \ln R_2 / R_1} \right)^2 \right]$$

OVER IN

$$p_1 = y_b - y_1 - \left[\frac{0,8}{h} + 0,1 + \frac{h}{3,5 \ln(1 + h/3,5)} \right]$$

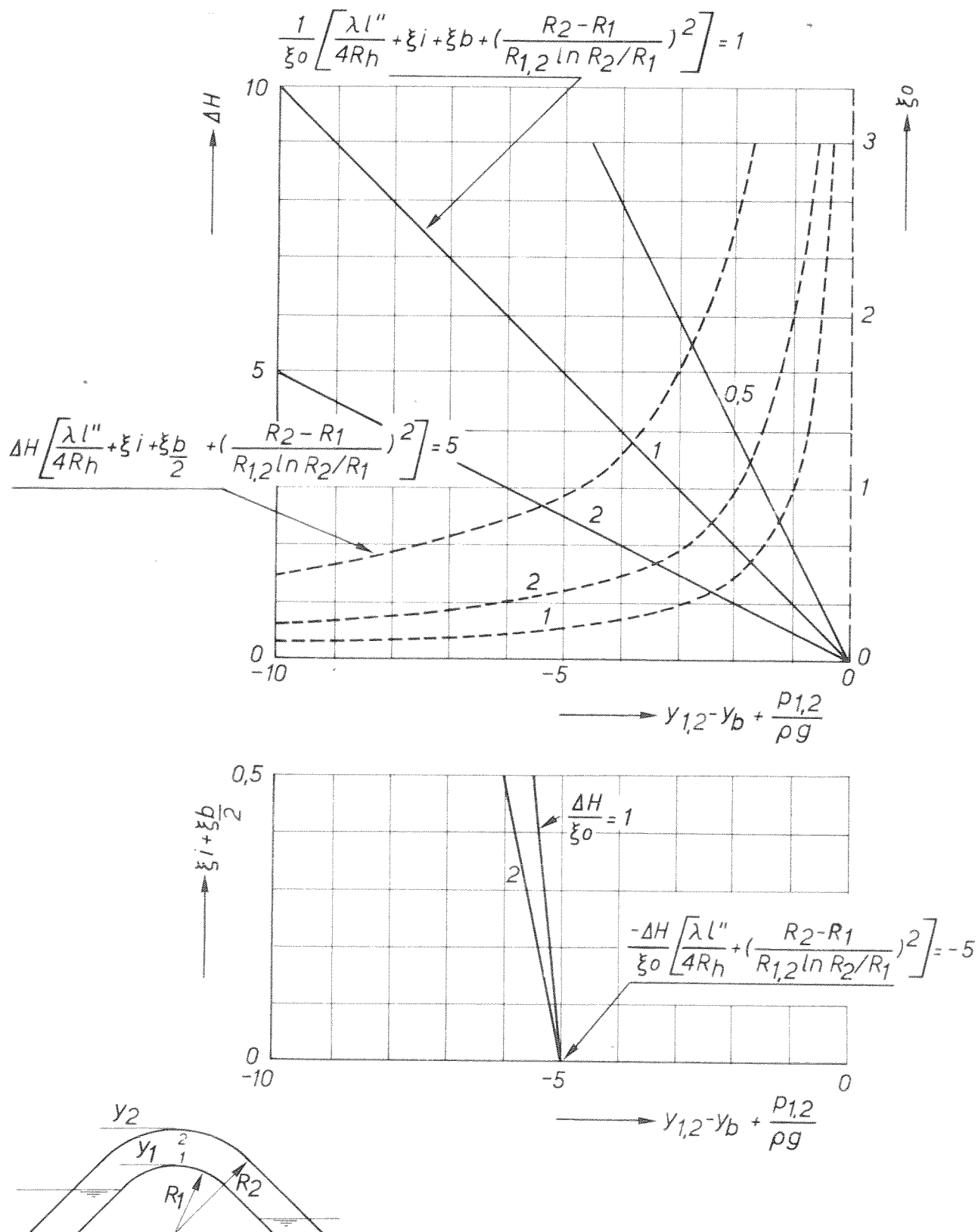
EN

$$p_2 = y_b - y_1 - h - \left[\frac{0,8}{h} + 0,1 + \frac{h}{(3,5 + h) \ln(1 + h/3,5)} \right]$$

DRUK HEVELKNIE ALS FUNKTIE VAN DE KNIEHOOGTE
(VOORBEELD SCHETSONTWERP)

j.z.

A4

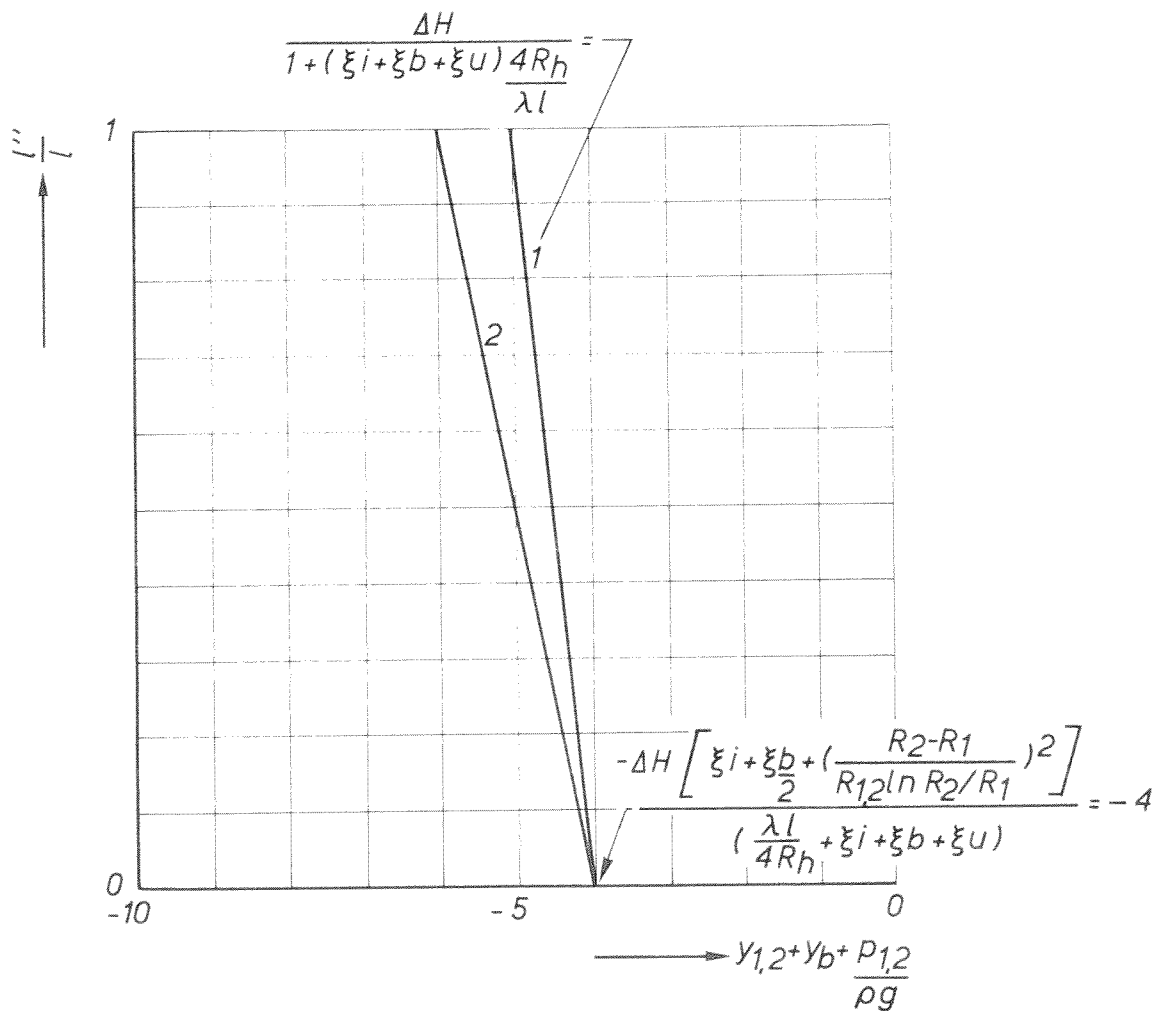


VERVAL VERLIESKOËFFICIËNT EN INLAAT- + BOCHT -
VERLIEZEN ALS FUNKTIE VAN DE DRUK IN DE HEVELKNIE

ZIE DEFINITIES
FIGUUR 1

j. z.

A4



$$y_{1,2} - y_b + \frac{p_{1,2}}{\rho g} = -\Delta H \frac{\left[\frac{\lambda l''}{4R_h} + \xi_i + \xi_b + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_{1,2} \ln R_2 / R_1} \right)^2 \right]}{\left(\frac{\lambda l}{4R_h} + \xi_i + \xi_b + \xi_u \right)}$$

DRUK HEVELKNIE ALS FUNKTIE VAN PLAATS HEVELKNIE

VOOR DEFINITIES
ZIE FIGUUR 1

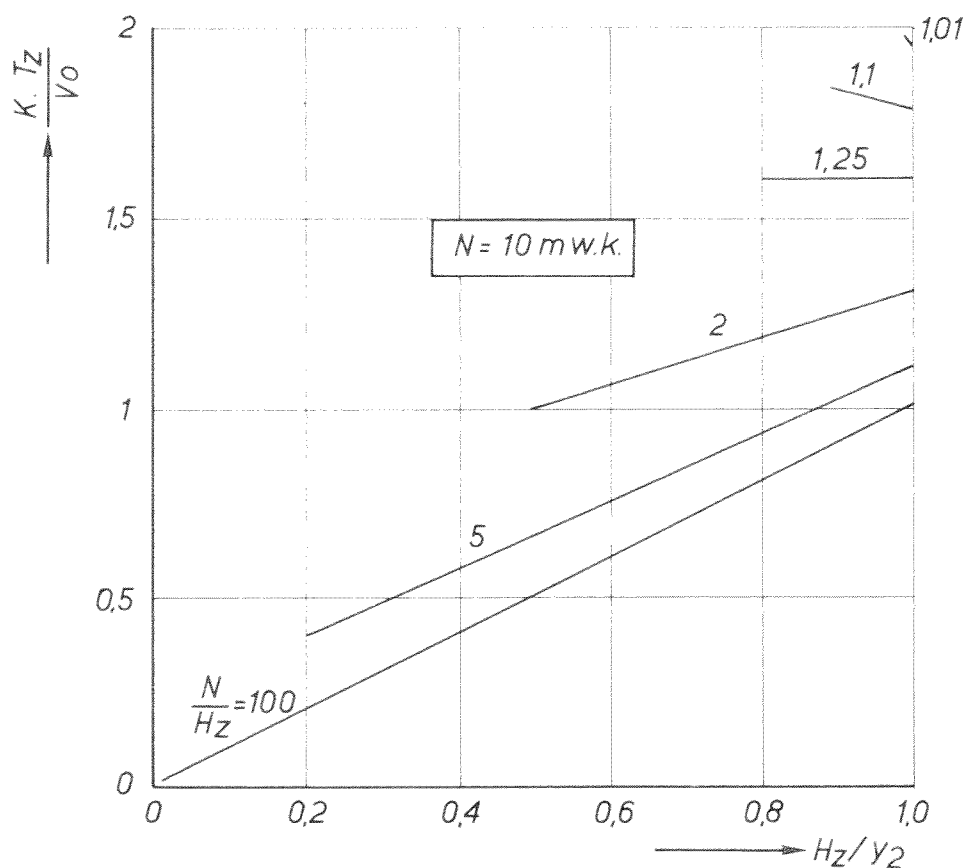
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 - 1014

FIG. 13

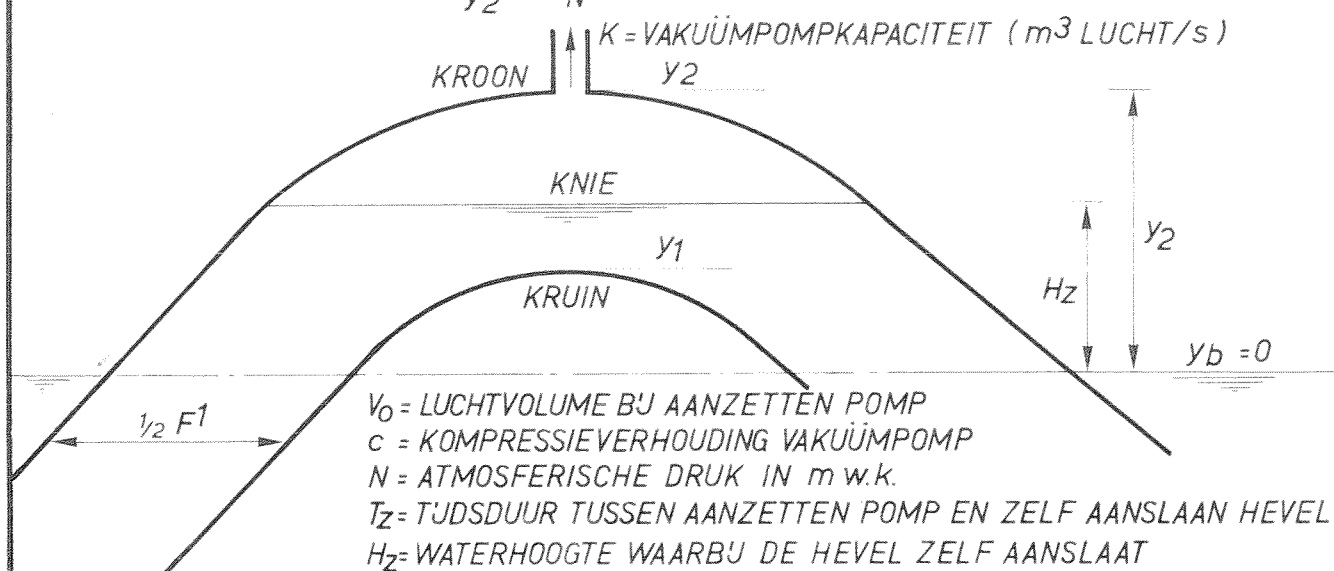


VOOR EEN HEVEL DIE BIJ GELIJKE BOVEN - EN BENEDENWATERSTANDEN WORDT AANGESLAGEN GELDT:

$$\frac{K \cdot T_z}{V_0} = 2 \frac{H_z}{y_2} + \left(1 - \frac{N}{H_z} \cdot \frac{H_z}{y_2}\right) \ln \left(\frac{1}{1 - H_z/N}\right)$$

ALS: $y_1 < H_z \leq y_2$ EN $c < 1 - H_z/N$.

UIT $y_2 < N$ VOLGT $\frac{H_z}{y_2} > \frac{H_z}{N}$



WATERSTANDEN EN POMPKAPACITEIT

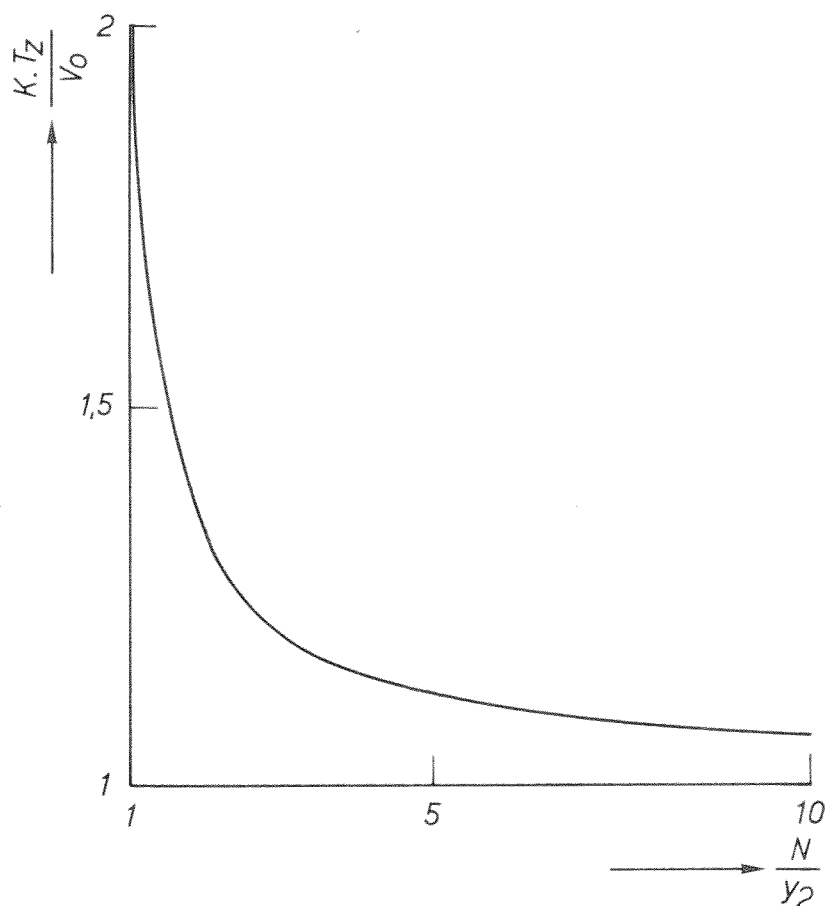
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R.806 - 1015

FIG.14



VOOR EEN HEVEL DIE BIJ GELIJKE BOVEN - EN BENEDEN-
WATERSTANDEN GEHEEL MECHANISCH AANGESLAGEN WORDT
(DUS ALS $H_Z = y_2$, ZIE FIGUUR 14) GELDT:

$$\frac{K.T_z}{V_0} = 2 + \left(1 - \frac{N}{y_2}\right) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{N}{y_2}} \right)$$

VOOR $y_1 < H_Z \leq y_2$ } ZIE VERDER FIGUUR 14
EN $c < 1 - H_Z/N$ }

POMPKAPACITEIT ALS FUNKTIE
VAN DE KROONHOOGTE

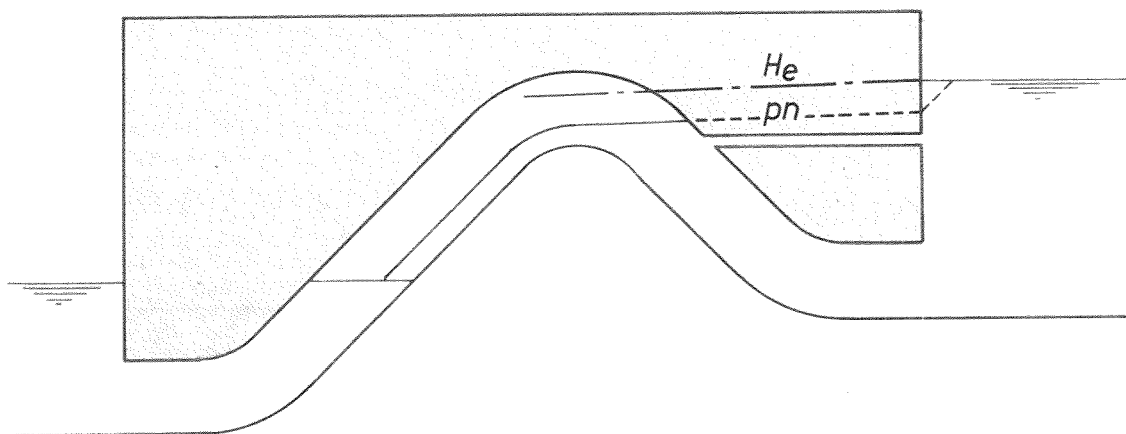
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 806 - 1016

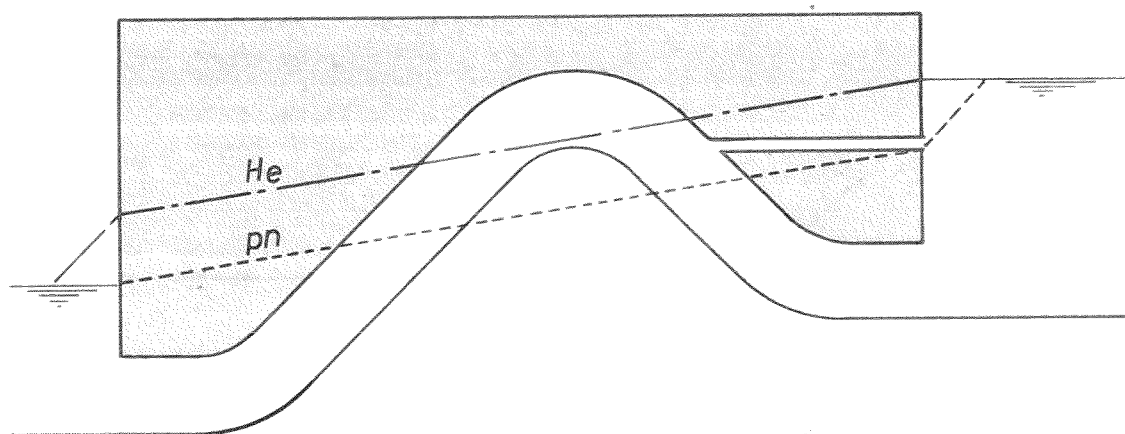
FIG. 15

j.z.

A4



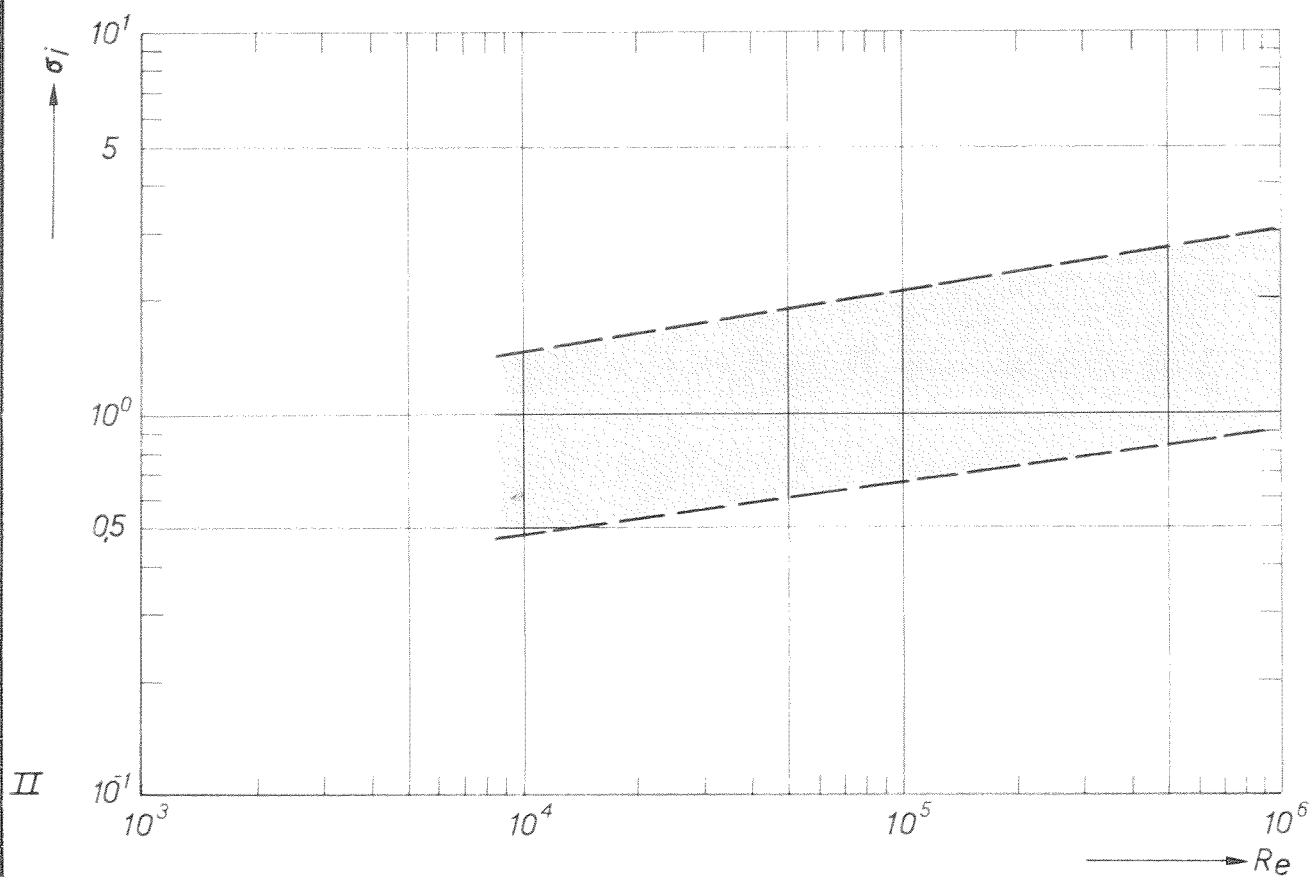
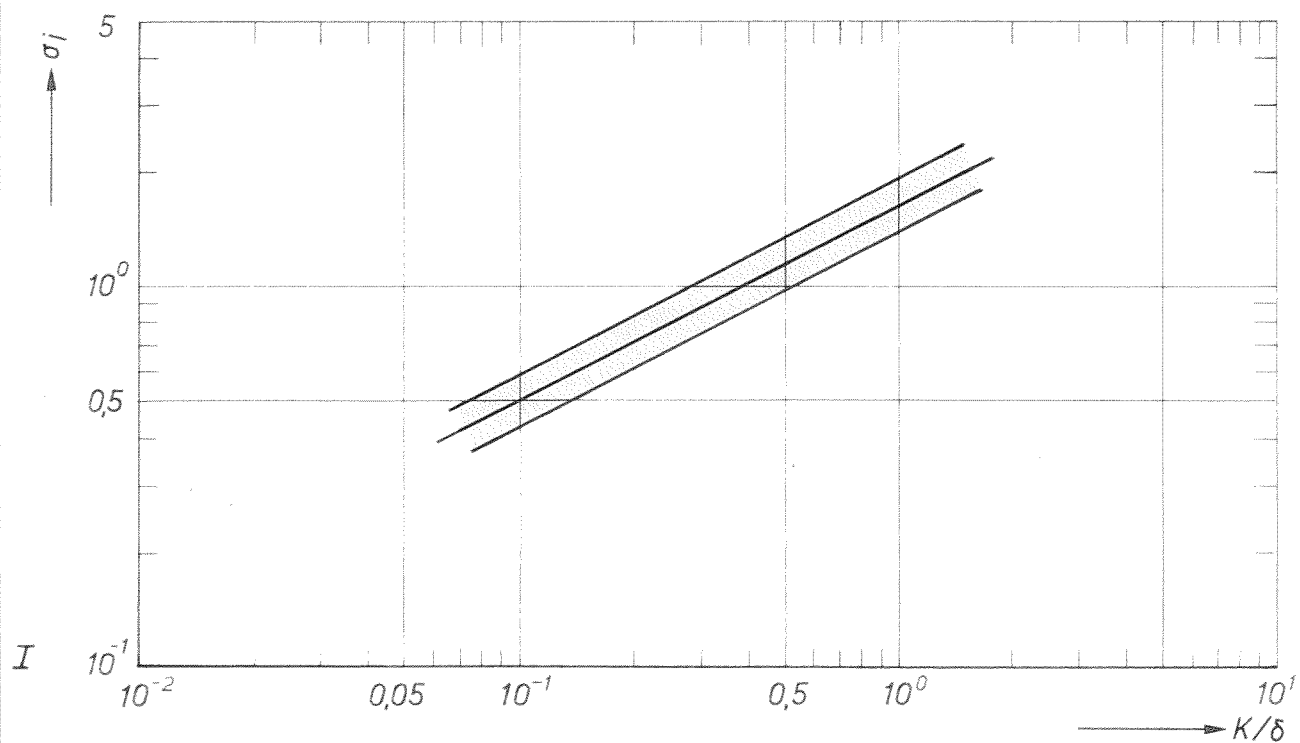
OVERSTORTENDE HEVEL



AANGESLAGEN HEVEL

p_n = PIËZOMETRISCH NIVEAU

ENERGIE - HOOGTEN (H_e)		j.z.
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R. 806 - 1018	FIG.17



KAVITATIE - INCEPTIE - GETALLEN

ZIE [15]

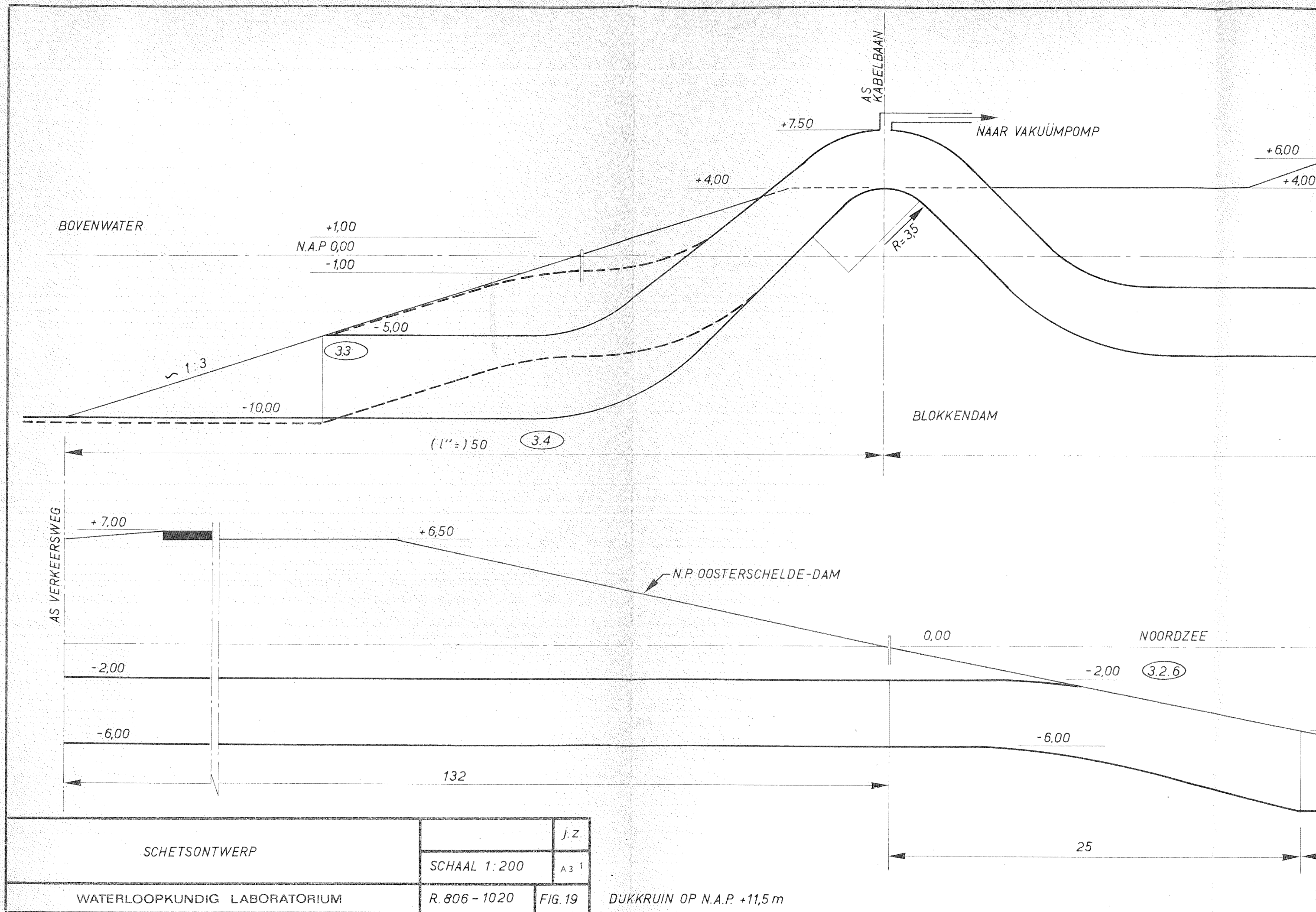
j.z.

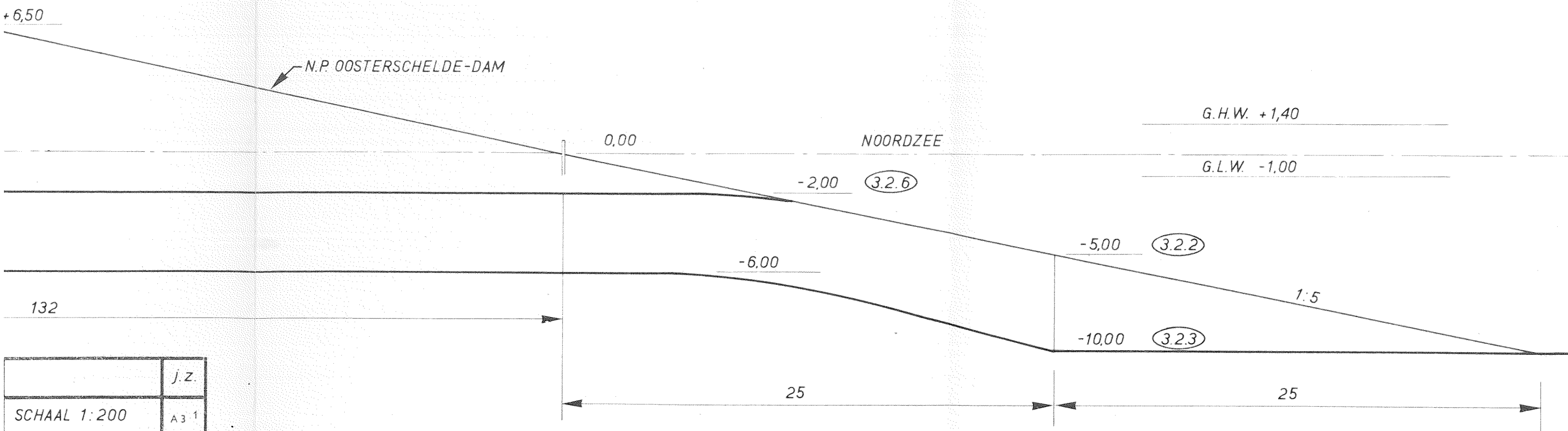
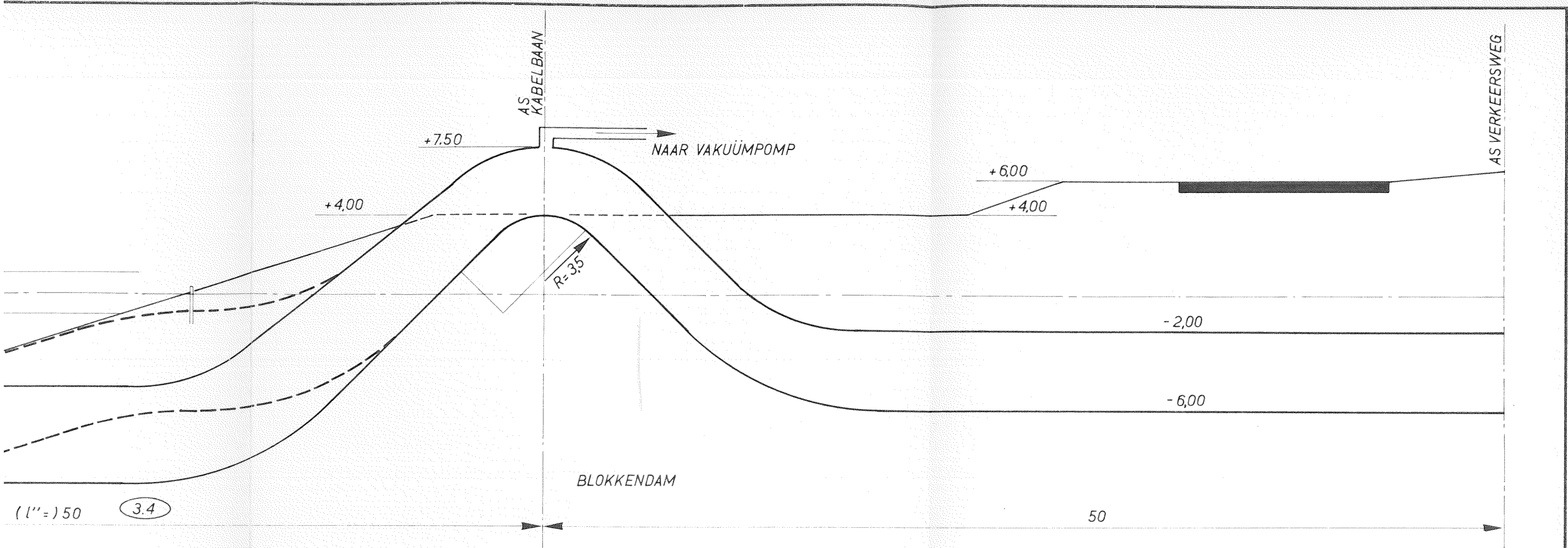
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R. 806 -

FIG. 18





	J.Z.
SCHAAL 1:200	A3 1
R. 806 - 1020	FIG. 19

DUKKRUIJN OP N.A.P. +11,5 m

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft