

Sluiscentrales in Nederland

een studie naar de haalbaarheid van waterkracht
uit schutsluizen en spuisluizen

eindrapport

S.A. van Lammeren

Utrecht, mei 2003



Colofon:

Student: S.A. van Lammeren
Waverstraat 12-1
1079 VL Amsterdam
06-41369699
s_vanlammeren@hotmail.com

Afstudeercommissie: Prof.drs.ir. J.K. Vrijling (TUDelft)
ir. J.S. de Koning (Bouwdienst Rijkswaterstaat)
dr.ir. S. van Baars (TUDelft)
ir. J. van Duivendijk (TUDelft)
dr.ir. H.L. Fontijn (TUDelft)

Onderwijsinstelling: Technische Universiteit
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Sectie Waterbouwkunde
Stevinweg 1
2628 CN Delft

Afstudeerinstelling: Bouwdienst Rijkswaterstaat
Afdeling Natte Infrastructuur en Constructieve Waterbouw (NIC)
Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht

Voorwoord

Dit eindrapport bevat de verslaglegging van het afstudeeronderzoek dat ik de afgelopen maanden bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat heb uitgevoerd. Het afstudeeronderzoek vormt de afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft, waarin ik heb gekozen voor de specialisatie constructieve waterbouwkunde.

Ik wil bij deze mijn afstudeercommissie bedanken voor de begeleiding tijdens het afstuderen: de heer De Koning bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat, de heren Vrijling, Van Baars, Van Duivendijk en Fontijn van de subfaculteit Civiele Techniek van de TU Delft.

Daarnaast wil ik alle overige medewerkers van de afdeling NIC van de Bouwdienst bedanken voor de gelegenheid om hier mijn afstuderen te kunnen afronden.

Bas van Lammeren

Utrecht, mei 2003

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting	viii
Lijst van figuren en tabellen	x
1 Inleiding	1
2 Probleemanalyse	3
2.1 Achtergrond	3
2.2 Probleemstelling	3
2.3 Doelstelling	4
2.4 Afbakening van het onderzoek	5
2.5 Literatuur	5
3 Locatieonderzoek	7
3.1 Selectiecriteria	7
3.1.1 Verval	7
3.1.2 Waterhuishouding en debiet	7
3.1.3 Sluisontwerp	8
3.1.4 Scheepvaart	8
3.1.5 Theoretisch en technisch potentieel	8
3.2 Bepaling potentieel projectlocaties	8
3.2.1 Theoretisch potentieel	8
3.2.2 Technisch potentieel	10
3.3 Locatiekeuze	13
3.4 Literatuur	14
4 Schutsluizencomplex Maasbracht	15
4.1 Het Julianakanaal	15
4.1.1 Beschrijving	15
4.1.2 Functie	15
4.1.3 Technische gegevens	15
4.2 Bestaande situatie sluizencomplex	16
4.2.1 Beschrijving complex	16
4.2.2 Technische gegevens	16
4.3 Geplande ingreep in het sluizencomplex	19
4.3.1 Project Maasroute	19
4.3.2 Onderdelen van de ingreep	19
4.3.3 Uitvoering van de kolkverlenging	19
4.3.4 Gevolgen van de ingreep voor de scheepvaart	19
4.4 Literatuur	20
5 Programma van Eisen sluiscentrale Maasbracht	21
5.1 Inleiding	21
5.2 Randvoorwaarden	22
5.2.1 Topografie en bodemgesteldheid	22
5.2.2 Rivierafvoer	22
5.2.3 Morfologie	22
5.2.4 Waterstanden	23
5.2.5 Bestaande kunstwerken	23
5.3 Gebruikseisen	23
5.3.1 Levensduur	24
5.3.2 Scheepvaart	24
5.3.3 Water keren	26
5.3.4 Water doorlaten	27
5.3.5 Kruising droge infrastructuur	27
5.3.6 Energiewinning	27
5.4 Onderhoudseisen	27
5.5 Omgevingseisen	28
5.6 Uitvoeringseisen	28

5.7	Literatuur	28
6	Functioneel en ruimtelijk ontwerp sluiscentrale	29
6.1	Integratiemogelijkheden waterkrachtcentrale in schutsluis	29
6.2	Doelfunctie	30
6.2.1	Doelfunctie	30
6.2.2	Variabelen	30
6.3	Functionele inpassing	31
6.3.1	Beschikbare hoeveelheid water	32
6.3.2	Schutfase	33
6.3.3	Spuifase	35
6.4	Ruimtelijke inpassing	36
6.4.1	Keuze voor de te verlengen kolk	36
6.4.2	Configuratie centrale	37
6.5	Literatuur	39
7	Turbineontwerp	41
7.1	Inleiding	41
7.2	Turbinetype	41
7.2.1	Crossflow turbine	41
7.2.2	Kaplan turbine	42
7.2.3	Axiale buisturbine	42
7.2.4	Bulb turbine	42
7.3	Aantal turbines	43
7.4	Ontwerpverval	43
7.5	Ontwerpdebiet	43
7.6	Waaierdiameter	44
7.6.1	Kaplan turbines	44
7.6.2	Axiale buisturbines	44
7.7	Hoogteligging turbineas	44
7.8	Turbinerendement	48
7.8.1	Kaplan turbines	48
7.8.2	Axiale buisturbines	48
7.9	Overbrenging	49
7.10	Keuze turbineontwerp	49
7.11	Literatuur	50
8	Hydraulisch ontwerp sluiscentrale	51
8.1	Doel van het hydraulisch ontwerp	51
8.2	Randvoorwaarden aan het ontwerp	51
8.2.1	Afmetingen sluiscentrale	51
8.2.2	Vultijd	51
8.2.3	Langskracht op schepen	51
8.3	Ontwerpmethode	52
8.4	Turbinerendement	52
8.5	Hydraulisch rendement	52
8.5.1	Wrijvingsverlies	52
8.5.2	Vormverliezen	53
8.6	Ontwerpalternatieven	53
8.6.1	Ontwerpdebiet en diameter turbine	53
8.6.2	Inpassing in bovenhoofd	54
8.6.3	Hydraulische verliescoëfficiënten	54
8.6.4	LOCKFILL berekening	55
8.7	Rendement gekozen alternatief	56
8.7.1	Hydraulisch rendement	56
8.7.2	Turbinerendement	58
8.8	Totaal ontwerp	58
8.8.1	Opbrengst van de centrale	58
8.8.2	Samenvatting ontwerpgegevens	60
8.9	Conclusies en opmerkingen	60
8.10	Literatuur	61
9	Hydraulische stabiliteit van de constructie	63

9.1	Inleiding	63
9.1.1	Ontgronding	63
9.1.2	Afschuiven	63
9.1.3	Kantelen	63
9.1.4	Opdrijven	63
9.1.5	Onder/achterloopsheid	63
9.2	Opdrijven	64
9.2.1	Waterdruk	64
9.2.2	Gewicht constructie	64
9.3	Onder/achterloopsheid	64
9.3.1	Onderloopsheid	64
9.3.2	Achterloopsheid	65
9.4	Aansluiting op omgeving	65
10	Economische analyse	67
10.1	Inleiding	67
10.1.1	Variabelen	67
10.1.2	Berekeningen	67
10.1.3	Aannamen	68
10.2	Kostenraming bestaand ontwerp	68
10.2.1	Systematiek van de kostenraming	68
10.2.2	Raming civieltechnische componenten	69
10.2.3	Raming staalbouwkundige componenten	70
10.2.4	Raming werktuigbouwkundige componenten	70
10.2.5	Raming installatietechnische componenten	70
10.2.6	Totale raming bestaand ontwerp	70
10.3	Opbrengst sluiscentrale	70
10.4	Kostenraming sluiscentrale	70
10.4.1	Kosten van onderhoud en beheer	70
10.4.2	Opbouw investeringskosten	70
10.4.3	Raming componenten schutsluis	71
10.4.4	Raming civiele componenten van de centrale	71
10.4.5	Raming staalbouw componenten centrale	71
10.4.6	Raming werktuigbouwkundige componenten centrale	71
10.4.7	Raming installatietechnische componenten centrale	71
10.4.8	Raming totale kosten sluiscentrale	71
10.5	De haalbaarheid van de centrale	73
10.6	Gevoeligheidsanalyse	74
10.7	Conclusies	75
10.8	Literatuur	75
11	Conclusies en aanbevelingen	77
11.1	Conclusies	77
11.2	Aanbevelingen	78
Literatuur		81

Bijlagen: apart rapport

Samenvatting

Nederland maakt voor de elektriciteitsvoorziening grotendeels gebruik van fossiele brandstoffen. Bij de productie van energie uit deze brandstoffen (kolen, olie, aardgas) komt echter een grote hoeveelheid CO₂ vrij. Op de wereldklimaatconferentie van Kyoto in 1997 is een protocol opgesteld waarin de deelnemende landen zich committeren om de uitstoot van deze broeikasgassen te reduceren. Deze vereiste reductie, alsmede de uitputting van de voorraden fossiele brandstoffen, heeft geleid tot stimulering van het ontwikkelen en gebruik van duurzame energie.

Het Ministerie van Economische zaken heeft in de Derde Energienota (1995) de doelstelling van de Nederlandse overheid met betrekking tot duurzame energie gepresenteerd: van de in 2020 geproduceerde (en geïmporteerde) energie moet 10% op duurzame wijze opgewekt worden, waarvan 1% door waterkracht. Dit betekent dat de jaarlijkse energieproductie uit waterkracht verachtvoudigd dient te worden: van 100 GWh nu tot 800 GWh in 2020.

De Nederlandse Organisatie Voor Energie en Milieu (NOVEM) heeft in een haalbaarheidsstudie aangetoond dat uit nog te realiseren grootschalige waterkrachtcentrales ongeveer 160 GWh energie per jaar opgewekt kan worden. Om aan de doelstelling van de Derde Energienota te kunnen voldoen zal dus naar alternatieven gezocht moeten worden.

Het doel van dit afstudeeronderzoek is hierin bij te dragen door het bepalen van de haalbaarheid van energiewinning uit het verval over schutsluizen en spuisluisen in Nederland. Het gaat hierbij met name om de technische haalbaarheid van de combinatie van een schutsluis of spuisluis en een waterkrachtcentrale, de zogenaamde sluiscentrale.

Het op een bepaalde locatie te installeren vermogen van een waterkrachtcentrale is evenredig met het product van het debiet door en verval over de centrale, een situatie die voorkomt tijdens het schutten van schepen in een schutsluis of het spuien van water door een spuisluis.

In de eerste fase van het onderzoek is een locatieonderzoek uitgevoerd, met als doel het selecteren van een locatie met het grootste waterkrachtpotentieel. Er zijn uitsluitend locaties onderzocht waarbij reeds een ingreep (nieuwbouw, renovatie of uitbreiding) gepland staat, zodat de investeringskosten voor de centrale geminimaliseerd kunnen worden.

Uit dit onderzoek bleek het schutsluizencomplex te Maasbracht in het Julianakanaal het grootste potentieel te hebben. Van dit complex, met een verval van ruim 12 m, wordt de oostelijke kolk verlengd, om de Maas en het Julianakanaal bereikbaar te maken voor klasse Vb scheepvaart. In de tweede fase is deze locatie nader uitgewerkt.

Allereerst zijn de functionele en ruimtelijke inpassing van de centrale in het sluizencomplex onderzocht.

De functionele inpassing betreft het inpassen van de centrale in het schutbedrijf. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt in twee fasen: schutten en spuien.

Kenmerkend voor de energiewinning in de schutfase is de korte periode van energieopwekking (het nivelleren van de kolk duurt circa 10 min.), het dalend vermogen van de centrale als gevolg van het afnemend verval en debiet en de afhankelijkheid van de scheepvaart: meer scheepvaart betekent een hogere energieopbrengst.

Op momenten dat er geen scheepvaart is, kan de kolk als spuisluis dienst doen: de deuren in het benedenhoofd worden geopend, zodat het volledige verval over de sluis benut kan worden voor energiewinning. Voor energiewinning tijdens het spuien door de sluis gelden een aantal voorwaarden: er kan alleen in het weekend bij weinig scheepsaanbod worden gespuid en de stroomsnelheid op het kanaal (en dus het debiet) mag niet te groot worden in verband met de scheepvaart. Daarbij is de opbrengst van de centrale direct afhankelijk van de aanvoer van water: in de zomer is het aangevoerde debiet te klein voor energiewinning. Het spuien is dan dus niet mogelijk.

Vervolgens is de ruimtelijke inpassing van de centrale onderzocht. Er zijn drie alternatieven voor deze inpassing mogelijk:

- Een blokcentrale naast de sluis
- Een pijlercentrale met turbines aan weerszijden van de sluis
- Een overstroombare centrale waarbij de scheepvaart over de centrale de kolk invaart.

Op basis van een aantal selectiecriteria met betrekking tot hinder voor de scheepvaart, kosten en ruimtebeslag is de overstroombare centrale als beste alternatief naar voren gekomen. Voor deze configuratie is vervolgens een turbineontwerp gemaakt.

De twee belangrijkste aspecten van het turbineontwerp zijn het rendement en het mogelijk optreden van cavitatie. Een turbine wordt ontworpen op een bepaald debiet en verval waarbij het rendement optimaal is, het zogenaamde ontwerppunt. Wanneer verval en/of debiet buiten dit punt treden, zal het rendement van de centrale dalen. Indien de turbine is voorzien van verstelbare leidschoepen en loopschoepen, kan ook buiten het ontwerppunt een hoog rendement gehaald worden. Voor de sluiscentrale is dan ook gekozen voor deze mogelijkheid, gezien het feit dat zowel het verval als het debiet grote variaties vertonen.

Cavitatie treedt op als de waterdruk lager wordt dan de dampdruk. Er ontstaan kleine dampbelletjes die kunnen imploderen op plaatsen waar de waterdruk hoger is. Omdat dit grote schade kan veroorzaken aan de turbine dient dit voorkomen te worden. Als de turbine voldoende diep wordt aangelegd ten opzichte van het waterniveau in de kolk kan cavitatie eenvoudig voorkomen worden.

Op basis van deze criteria is gekozen voor het installeren van twee axiale buisturbines.

Behalve het rendement van de turbine heeft de vormgeving van het vulsysteem eveneens invloed op de energieproductie van de centrale. Door vormveranderingen en wandwrijving in de riolen zal het door de turbine te benutten verval kleiner zijn dan het bruto verval. In het hydraulisch ontwerp van de centrale is gezocht naar de optimale vormgeving van het vulsysteem.

Op basis van de geselecteerde turbines en het hydraulisch ontwerp is in de laatste fase een economische analyse gemaakt, waarin de opbrengst van de centrale is uitgezet tegen de kosten van onderhoud en de initiële investering.

In de kostenraming is een duidelijk onderscheid gemaakt in kosten voor de centrale en kosten voor de kolkverlenging. Uit deze analyse bleek dat de centrale economisch alleen haalbaar is, indien de energiewinning zowel door het schutten als door het spuien tot stand komt. In dat geval is tevens een deel van de investeringskosten voor de kolkverlenging terug te verdienen. De centrale zal niet rendabel zijn als alleen energie gewonnen wordt tijdens het schutbedrijf.

De belangrijkste aanbevelingen die op basis van dit onderzoek gedaan kunnen worden, zijn het uitvoeren van modelonderzoek naar het hydraulisch rendement van de centrale, het effect van de centrale op de in de kolk afgemeerde schepen en het nauwkeurig bepalen van het turbinerendement, om tot een gedetailleerdere berekening van de opbrengst van de centrale te komen. Indien de centrale in Maasbracht wordt uitgevoerd, zal ook in Born een sluiscentrale moeten worden aangelegd. Dit heeft in de eerste plaats betrekking op het feit dat het spuidebiet op het kanaal ook het sluisencomplex in Born zal moeten passeren. Daarnaast is het complex vrijwel identiek aan dat in Maasbracht, met een iets kleiner verval.

Lijst van figuren en tabellen

Figuren

Figuur 3-1 Theoretisch potentieel onderzoekslocaties	9
Figuur 4-1 Stuw Borgharen, gezien in zuidelijke richting	15
Figuur 4-2 dwarsprofielen Julianakanaal	16
Figuur 4-3 Sluizencomplex Maasbracht, zicht vanaf het Julianakanaal	16
Figuur 4-4 Hevelsysteem	17
Figuur 5-1 PvE structuur	21
Figuur 5-2 Ontwerpgebied sluiscentrale (peilen in meters t.o.v. NAP)	21
Figuur 5-3 Boorprofiel bovenpand Maasbracht	22
Figuur 5-4 Langskrachten op schepen in een schutkolk	26
Figuur 6-1 Turbine in sluisdeur	29
Figuur 6-2 Beschikbaar turbineerbaar debiet	35
Figuur 7-1 Kaplan in gewone opstelling (links) en sifon opstelling (rechts)	42
Figuur 7-2 Axiale buisturbine (S-configuratie)	42
Figuur 7-3 Bulb turbine	43
Figuur 7-4 Plaatsing turbineas in sluiscentrale	43
Figuur 7-5 Definitie schets waterkrachtcentrale	45
Figuur 7-6 Cavitatieparameter σ als functie van het specifieke toerental n_s	46
Figuur 7-7 Maximale hoogte turbineas boven benedenwater als functie van verval	47
Figuur 7-8 Rendement Kaplan turbine	48
Figuur 7-9 Rendement Axiale buisturbine	49
Figuur 8-1 Ontwerpschema voor hydraulisch ontwerp	52
Figuur 8-2 Ontwerp inpassing centrale in bovenhoofd	54
Figuur 8-3 Resultaten LOCKFILL	56
Figuur 8-4 Energiehoogte verlies	57
Figuur 8-5 Hydraulisch rendement sluiscentrale	57
Figuur 8-6 Turbinerendement sluiscentrale	58
Figuur 8-7 Opbrengst van de centrale	58

Tabellen

Tabel 3-1 Verschillen theoretisch en technisch potentieel	10
Tabel 3-2 Aantal schuttingen	12
Tabel 3-3 Energieopbrengst onderzoekslocaties	12
Tabel 3-4 Energieopbrengst van diverse locaties	13
Tabel 5-1 Beschikbaarheid voor scheepvaart sluizencomplex Maasbracht	24
Tabel 5-2 Troskrachtcriterium voor binnenvaartschepen	26
Tabel 6-1 Opschuttende scheepvaart Maasbracht (2001)	34
Tabel 6-2 Turbineerbaar debiet	36
Tabel 6-3 Vergelijking sluiskolken Maasbracht voor kolkverlenging	36
Tabel 6-4 Vergelijking sluiskolken Maasbracht voor inpassing waterkrachtcentrale	37
Tabel 6-5 Beoordeling centrale configuraties	38
Tabel 6-6 Voordelen en nadelen configuraties voor sluiscentrale	39
Tabel 8-1 Wandruwheid	53
Tabel 8-2 Programma schuiven	55
Tabel 8-3 Energieopbrengst uit spuien, maximaal spuidebiet 65 m ³ /s	59
Tabel 8-4 Energieopbrengst uit spuien, maximaal spuidebiet 45 m ³ /s	59
Tabel 8-5 Samenvatting ontwerpgegevens	60
Tabel 10-1 Kostenraming bovenhoofd met woelkelder	69
Tabel 10-2 Vergelijking investeringskosten civiele component	71
Tabel 10-3 Kostenvergelijking bestaand ontwerp en ontwerp met sluiscentrale	72
Tabel 10-4 Terugverdientijden voor verschillende investeringen en opbrengsten	73
Tabel 10-5 Terugbetaalperioden sluiscentrale	73
Tabel 10-6 Netto contante waarde als functie van rentestand en economische levensduur	73
Tabel 10-7 Projectresultaat sluiscentrale	74
Tabel 10-8 Vergelijking haalbaarheid centrales	74
Tabel 10-9 Projectresultaat als functie van rentestand en energievergoeding	74

1 Inleiding

Nederland maakt voor de elektriciteitsvoorziening grotendeels gebruik van fossiele brandstoffen. Bij de productie van energie uit deze brandstoffen (kolen, olie, aardgas) komt echter een grote hoeveelheid CO₂ vrij. Op de wereldklimaatconferentie van Kyoto in 1997 is een protocol opgesteld waarin de deelnemende landen zich committeren om de uitstoot van deze broeikasgassen te reduceren. In Nederland moet de uitstoot in 2010 met 6% zijn gereduceerd ten opzichte van de uitstoot in 1990.

Deze vereiste reductie, alsmede de uitputting van de voorraden fossiele brandstoffen, heeft geleid tot stimulering van het ontwikkelen en gebruik van duurzame energie. Onder duurzame energie wordt hier verstaan: de productie van elektrische energie uit zonnestraling, wind, afval, biomassa en waterkracht.

Dit onderzoek draagt hierin bij door de haalbaarheid van energiewinning uit het verval over schut- en spuisluisen in Nederland te onderzoeken.

De opbouw van dit rapport is als volgt: in hoofdstuk twee wordt de aanleiding van dit rapport gepresenteerd met de daarbij behorende probleemstelling, doelstelling en afbakening van het onderzoek. Hoofdstuk drie betreft het locatieonderzoek waarna in hoofdstuk vier een beschrijving gegeven wordt van de nader uit te werken locatie. In hoofdstuk vijf wordt het locatiespecifieke Programma van Eisen uitgewerkt, de functionele en ruimtelijke inpassing van een alternatief ontwerp met waterkrachtcentrale staat centraal in hoofdstuk zes. Voor dit alternatieve ontwerp wordt in hoofdstuk zeven het turbineontwerp gemaakt, gevolgd door het hydraulisch ontwerp in hoofdstuk 8. Hoofdstuk 9 en 10 behandelen de hydraulische stabiliteit respectievelijk de economische analyse van de constructie. In hoofdstuk 11 volgen de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

2 Probleemanalyse

In dit hoofdstuk wordt de aanleiding van het onderzoek gepresenteerd welke leidt tot de formulering van de probleemstelling en doelstelling. In de laatste paragraaf komt de afbakening en opbouw van het onderzoek aan de orde.

2.1 Achtergrond

In 1995 heeft het Ministerie van Economische Zaken de Derde Energienota gepresenteerd, waarin is bepaald dat van de in 2020 geproduceerde (en geïmporteerde) energie, 10% op duurzame wijze opgewekt moet worden. Op dit moment is dat aandeel slechts 1,2%. Het aandeel van waterkracht is in 2020 begroot op 1% van de hoeveelheid geproduceerde duurzame energie, wat neerkomt op 3 PJ uitgespaarde fossiele brandstof (zie bijlage A). Dit staat gelijk aan ruim 800 GWh elektriciteit per jaar. Er zijn in Nederland momenteel vier waterkrachtcentrales operationeel met een gezamenlijk opgesteld vermogen van 37,5 MW, goed voor ruim 100 GWh elektriciteit per jaar.

Om aan de ambitieuze doelstelling van de Derde Energienota te voldoen, zal de jaarlijkse elektriciteitsproductie uit waterkracht in 2020 dus met ongeveer 700 GWh vergroot moeten worden. In opdracht van het Ministerie van Economische zaken heeft de Nederlandse Organisatie Voor Energie en Milieu (NOVEM) een onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van waterkracht in Nederland. In 1996 presenteerde zij een rapport met de resultaten van dit onderzoek: bij de stuwen in de Maas (7 locaties) kan mogelijk 35 MW vermogen geïnstalleerd worden, met een totale jaarproductie van 166 GWh.

Het realistisch haalbare totale vermogen van waterkracht in Nederland wordt geraamd op ongeveer 140 MW, inclusief het reeds opgestelde vermogen van 37,5 MW. Vooral bij de stuw te Borgharen in de Maas en bij de sluizen te Born en Maasbracht in het Julianakanaal is een groot potentieel op rendabele wijze te winnen. Bij de stuw van Borgharen kan 30 GWh (7,7 MW) opgewekt worden, bij Born en Maasbracht kan 28 GWh (4,2 MW) respectievelijk 30 GWh (4,4 MW) per jaar geproduceerd worden. Dit is echter lang niet genoeg om aan het streven van de Derde Energienota te voldoen. Er zal dus naar alternatieven gezocht moeten worden.

Het op een bepaalde locatie te installeren vermogen van een waterkrachtcentrale is evenredig met het product van het doorgevoerde debiet door en verval over de centrale (zie ook de literatuurstudie in bijlage A). Het is dus mogelijk om met een klein verval en een groot debiet een aanzienlijke hoeveelheid energie op te wekken, een in Nederland veel voorkomende situatie. Dit heeft met name betrekking op de Rijn en de Maas. De Rijn heeft een sterk variërend debiet (1200 m³/s tot 1800 m³/s) en een vrij klein verval. De Maas heeft een groter potentieel: weliswaar een kleiner debiet (gemiddeld tussen 250 en 300 m³/s), maar een groter verval: 44 meter over een lengte van 185 km. Dat levert in theorie ruim 100 MW vermogen op.

Er zijn vele typen waterbouwkundige kunstwerken waarbij sprake is van zowel verval als debiet. Voorbeelden hiervan zijn keersluizen, gesloten duikers, gemalen en inlaatsluizen. Twee veelvuldig in Nederland voorkomende typen waterbouwkundige kunstwerken waarbij sprake is van debiet en verval zijn schutsluizen en spuisluisen.

Schutsluizen

Schutsluizen hebben als doel het verticaal transport van schepen waarbij gebruik gemaakt wordt van een afsluitbare schutkolk. Het peil in deze kolk is variabel. Bij het nivelleren van de kolk worden schuiven in deuren of omloopriolen geopend, waardoor water in of uit de kolk kan stromen. Er is dus sprake van een debiet. Samen met het verval dat over een schutsluis staat, ontstaat de mogelijkheid van energiewinning.

Spuisluisen

Spuisluisen worden gebruikt om het peil van een bepaald waterpand te beheersen. Wanneer dit peil boven het streefpeil stijgt, wordt de sluis opengezet en wordt het teveel aan water in het pand op het buitenwater afgelaten. Dit spuien vindt plaats onder natuurlijk verval. Ook hier is de mogelijkheid van energiewinning aanwezig: water wordt onder natuurlijk verval met een bepaald debiet afgelaten.

2.2 Probleemstelling

De bijdrage van waterkracht aan de opwekking van duurzame energie in Nederland is nog beperkt. De overheid heeft zich in de Derde Energienota een vergroting van de bijdrage van duurzame energie aan de totale energieproductie ten doel gesteld. Met de huidige centrales en de door NOVEM onderzochte mogelijke toekomstige bouwlocaties kan niet aan deze doelstelling voldaan worden. Er zal dus gekeken moeten worden naar energiewinning uit waterkracht op andere locaties en andere manieren.

Vanwege het grote aantal schutsluizen en spuisluizen in Nederland ligt het voor de hand om naar deze locaties te kijken. Hier is immers al verval aanwezig. In de voorgaande paragraaf is gesteld dat het te installeren vermogen op een locatie evenredig is met het product van debiet en verval. Tijdens het nivelleren van een schutsluis neemt het verval (en daarmee ook het debiet) af. Het vermogen tijdens het nivelleren neemt dus ook af. Bij spuisluizen is dit eveneens het geval, zij het dat dit langer duurt. Dit, en de korte periode van energiewinning tijdens het schutten of spuien vormt de kern van het probleem van energiewinning bij deze kunstwerken.

De probleemstelling luidt nu als volgt:

Er wordt in Nederland nog niet voldaan aan de doelstelling van de Derde Energienota met betrekking tot energiewinning uit waterkracht.

2.3 Doelstelling

Om aan de doelstelling van de overheid met betrekking tot duurzame energie te kunnen voldoen, is het noodzakelijk om een studie uit te voeren naar nieuwe mogelijkheden van energiewinning uit waterkracht. Het ligt voor de hand om gebruik te maken van locaties waar al (kunstmatig) verval aanwezig is. Dit is onder andere het geval bij de vele schutsluizen en spuisluizen in Nederland. Dit afstudeeronderzoek zal zich richten op de haalbaarheid van energiewinning bij deze typen waterbouwkundige kunstwerken in Nederland.

Met de probleemstelling uit paragraaf 2.2 leidt dit tot de volgende doelstelling:

Het bepalen van de haalbaarheid van en het maken van een ontwerp voor een combinatie van een schutsluis of spuisluis en een waterkrachtcentrale, een zogenaamde sluiscentrale.

Deze doelstelling is ook in de vorm van een aantal onderzoeksvragen te formuleren:

- 1 Waar kan in Nederland energie gewonnen worden uit het verval over schutsluizen en spuisluizen?
- 2 Hoe kan het verval over een schutsluis of spuisluis gebruikt worden voor energiewinning?
- 3 Hoe ziet het ontwerp voor zo'n sluiscentrale er uit?
- 4 Is de aanleg van zo'n centrale economisch haalbaar, m.a.w.: worden de investeringskosten binnen afzienbare tijd terugverdiend door de verkoop van energie?

Het doel van dit onderzoek is het geven van een antwoord op bovenstaande vragen.

2.4 Afbakening van het onderzoek

In de voorgaande paragraaf is het bepalen van de haalbaarheid van de sluiscentrale als doel gesteld. De haalbaarheid omvat echter een groot aantal aspecten, zodat niet over de haalbaarheid gesproken kan worden. Voor meer informatie over de haalbaarheidsstudie voor een waterkrachtcentrale en de plaats daarvan in het bouwproces wordt verwezen naar bijlage A (literatuurstudie). De onderdelen van de haalbaarheidsstudie die in dit onderzoek achtereenvolgens aan bod komen zijn de volgende:

- Uitvoeren van een locatieonderzoek: het bepalen van de meest geschikte locatie voor de sluiscentrale (hoofdstuk 3).
- Opstellen van een locatiespecifiek Programma van Eisen (PvE) voor de sluiscentrale (hoofdstuk 5).
- Onderzoeken van de functionele en ruimtelijke inpassing van de centrale in de schut- of spuisluis (hoofdstuk 6).
- Het maken van een hydraulisch ontwerp: selecteren van de meest geschikte turbine (hoofdstuk 7), bepalen van het hydraulisch rendement en het visualiseren van de centrale (hoofdstuk 8).
- Het uitvoeren van een economische analyse: het berekenen van de energieproductie en bouw- en onderhoudskosten van de centrale (hoofdstuk 10).

Hoewel de beslissing of een centrale gerealiseerd zal worden, mede gemaakt wordt op basis van economische afwegingen, zal de nadruk in dit onderzoek liggen op de technische haalbaarheid van de sluiscentrale. De reden hiervoor ligt in de aanleiding van het onderzoek: het stimuleren en vergroten van het gebruik van duurzame energie (doelstelling Derde Energienota) en de vereiste reductie van broeikasgassen (Kyoto protocol). Er zal wel een economische analyse gemaakt worden, maar deze zal een globaal karakter hebben.

De levering van de energie (zelfvoorziening, levering aan lokaal, regionaal of nationaal net) valt buiten het kader van dit onderzoek. Ook de effecten van de centrale op de omgeving en de financieringsmogelijkheden voor het project zullen niet in dit onderzoek worden uitgewerkt.

2.5 Literatuur

- {2.1} *Derde Energienota*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken, 1995.
- {2.2} *Grootschalige waterkracht in Nederland, openbaar eindrapport Nederlandse Onderneming Voor Energie en Milieu (NOVEM)*. Delft: Adviesbureau Stroom-Lijn, 1996.
- {2.3} Duivendijk, J. van., *Energiewaterbouwkunde*. Delft: TUDelft, collegedictaat CT5304, maart 2002.

3 Locatieonderzoek

In dit hoofdstuk wordt onderzocht welke locatie in Nederland het meest geschikt is voor de sluiscentrale. In de eerste paragraaf worden de criteria bepaald waarop de diverse locaties getoetst worden. In paragraaf twee worden de relevante gegevens voor het maken van een locatievergelijking verzameld, waarna in de derde paragraaf het potentieel van de locaties wordt bepaald. In de laatste paragraaf wordt een keuze gemaakt voor de nader te onderzoeken locatie.

3.1 Selectiecriteria

De te onderzoeken locaties dienen op een aantal voor de centrale relevante criteria vergeleken te worden. Voor zover van toepassing zal hierbij onderscheid gemaakt worden tussen energiewinning tijdens schutten en tijdens spuien.

Overeenkomstig de doelstelling van dit onderzoek (zie hoofdstuk 2) ligt de nadruk bij het selecteren van de meest geschikte locatie op het technisch potentieel. De selectiecriteria die hierop betrekking hebben, zijn de volgende:

- Verval
- Waterhuishouding en debiet
- Sluisontwerp
- Scheepvaart
- Theoretisch en technisch potentieel

Het theoretisch en technisch potentieel zijn afhankelijk van de daarboven genoemde vier criteria.

Omdat de economische haalbaarheid niet helemaal buiten beschouwing gelaten kan worden, zullen de investeringskosten voor een bepaalde locatie ook in overweging genomen worden.

In het onderzoek wordt daarom uitsluitend gekeken naar nieuw te bouwen, uit te breiden of te renoveren kunstwerken. In deze gevallen wordt slechts een deel van de investeringskosten aan de centrale toegeschreven, wat leidt tot een aanzienlijke vergroting van de economische haalbaarheid.

3.1.1 Verval

Het waterkrachtpotentieel van een bepaalde locatie is recht evenredig met het verval op die locatie. Dit potentieel is uiteraard afhankelijk van alle bovengenoemde selectiecriteria, maar bij gelijkblijvende overige criteria geldt voor het aanwezige verval deze regel.

Tijdens het nivelleren van de schutsluis en gedurende het spuien neemt het verval over de sluis af. In het eerste geval is de tijdschaal waarop het verval afneemt echter vele malen kleiner.

Indien bovenstrooms van een schutsluis voldoende water wordt aangevoerd (zie ook paragraaf 3.1.2), kan de sluis gebruikt worden om water te spuien. In dit geval zijn verval, debiet en dus het vermogen constant.

3.1.2 Waterhuishouding en debiet

De waterhuishouding van het omliggende gebied is een belangrijk criterium voor de bepaling van het potentieel van de diverse locaties. Eisen met betrekking tot de waterhuishouding betreffen meestal het handhaven van het waterpeil in een bepaald pand of het garanderen van een bepaald debiet door een waterloop. Als gevolg hiervan moet het debiet dat voor energiewinning gebruikt wordt, gelimiteerd worden. Dit heeft met name betrekking op de mogelijkheid van het spuien van water door een schutsluis voor energiewinning bij lage scheepvaartintensiteit. Voor spuisluisen is deze eis niet relevant omdat de spuisluis juist gebruikt wordt voor het beheersen van een bepaald waterpeil.

Als een schip door een schutsluis gescht wordt, zal er altijd water via de sluis van het bovenpand naar het benedenpand afgevoerd worden. Het kan echter zo zijn dat het waterverlies in het bovenpand beperkt moet blijven. Hiervoor kunnen spaarbekkens worden toegepast. Ook kan het schutverlies gecompenseerd worden door water van het benedenpand naar het bovenpand terug te pompen door een gemaal of door het toelaten van een debiet op het bovenpand.

De watertoevoer (het debiet) naar de centrale hangt nauw samen met de waterhuishouding. Tijdens het schutten is de watertoevoer van belang voor de nivelleertijd van de kolk.

Voor energiewinning bij spuisluisen is de watertoevoer (eigenlijk de waterafvoer) van groot belang. De afvoer moet voldoende groot zijn om een bepaalde hoeveelheid water in zo kort mogelijke tijd af te voeren. Dit speelt met name wanneer het peil van het buitenwater niet constant is, zoals bij het uitwateren op zee het geval is.

Bij rivieren moet gekeken worden naar de variaties in de afvoer gedurende het jaar. De afvoer kan namelijk grote verschillen vertonen. De capaciteit van de centrale (het aantal turbines) moet hierop worden afgestemd om te

voorkomen dat de centrale gedurende een groot deel van het jaar stil komt te liggen vanwege te weinig (of te veel) wateraanvoer.

3.1.3 Sluisontwerp

Het sluisontwerp is eveneens een belangrijk criterium voor de locatieselectie. Het gaat hierbij vooral om de beschikbare ruimte rond de sluis voor het inpassen van een centrale. Voor schutsluizen dient daarnaast ook gelet te worden op de invloed van de centrale op de scheepvaart door naastgelegen sluizen, het type vul/ledigsysteem, de grootte van de schutschijf (het product van verval en kolkoppervlak) en het deurtype in de sluishoofden. Deze laatste heeft invloed op de vormgeving van de sluishoofden en dus op de centrale. Voor de te onderzoeken locaties zal het ontwerp (waar mogelijk) van de sluizen dus in de afweging meegenomen worden.

3.1.4 Scheepvaart

De hinder van de centrale voor de scheepvaart moet geminimaliseerd worden. Daarentegen is de opbrengst van een centrale in een schutsluis wel direct afhankelijk van die scheepvaart: hoe vaker geschut wordt, hoe vaker de centrale gebruikt wordt. In het locatieonderzoek moet voor elke mogelijke locatie de scheepvaartintensiteit en klasse bepaald worden. Onder hinder voor de scheepvaart valt zowel fysieke hinder, zoals (dwars)stromen bij de uitstroomopening van turbine, turbulentie en krachten op het schip, als verlenging van de schutcyclus (langer oponthoud bij de sluizen). Over deze aspecten kan in dit stadium nog weinig gezegd worden, zodat het selectiecriterium 'scheepvaart' in deze fase uitsluitend betrekking heeft op de intensiteit (aantal passages) op de diverse locaties.

Dit criterium is niet van toepassing op spuisluisen.

3.1.5 Theoretisch en technisch potentieel

Uiteindelijk zal die locatie gekozen worden met het grootste potentieel. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in het theoretisch en technisch potentieel, zie ook bijlage A.

Theoretisch potentieel

Het theoretisch potentieel is de maximale hoeveelheid energie die op jaarbasis op een locatie beschikbaar is {lit. 3.1}. Dit is gelijk aan het vermogen van de centrale, vermenigvuldigd met de tijdsduur dat dit vermogen geleverd wordt. Het vermogen is in dit geval afhankelijk van het bruto maximale verval over het kunstwerk, met bijbehorend debiet.

Technisch potentieel

Het theoretisch potentieel van een bepaalde locatie is niet winbaar. Ten eerste omdat er altijd verliezen zijn in de aanvoerleidingen, turbine en generator, ten tweede omdat er geen sprake is van een constant verval en debiet. Het technisch potentieel is daarom gedefinieerd als de maximale hoeveelheid energie die bij een schutsluis of spuisluis te winnen is, gegeven een bepaald turbinetype en verloop van verval en debiet in de tijd. Het technisch potentieel bestaat dus uit een correctie van het theoretisch potentieel.

Het theoretisch en technisch potentieel zijn de directe selectiecriteria waarop de keuze voor een bepaalde locatie gemaakt zal worden. Het theoretisch en technisch potentieel zijn op hun beurt weer afhankelijk van de hiervoor beschreven criteria.

3.2 Bepaling potentieel projectlocaties

Met de verzamelde gegevens kan het potentieel van de diverse locaties bepaald worden. Aan de hand van dit potentieel zal in de volgende paragraaf een keuze gemaakt worden voor een van de locaties. Voor deze locatie zal een voorlopig ontwerp van de sluiscentrale gemaakt worden.

Het te berekenen potentieel wordt opgesplitst in het theoretisch potentieel en het technisch potentieel. Het technisch potentieel betreft uitsluitend de energiewinning tijdens het nivelleren van de schutkolken omdat het benutten van de kolk als spuisluis slechts beperkt mogelijk zal zijn (alleen bij weinig of geen scheepvaart).

3.2.1 Theoretisch potentieel

Het theoretisch potentieel (in kWh of MWh) is in paragraaf 3.1.5 gedefinieerd als de maximale hoeveelheid energie die op een bepaalde locatie beschikbaar is:

$$E_{th} = \int_0^T P dt \quad [3.1]$$

Met:

P = vermogen (kW)

T = aantal uren in een jaar = 8760

Het theoretisch potentieel (op jaarbasis) van een locatie is dus het product van vermogen en tijd: er is het hele jaar afvoer en verval aanwezig. Voor een schutsluis zou dit betekenen dat de benedendeuren van de sluis het hele jaar open staan en dat er continu water door het vulsysteem en de turbine gevoerd wordt. De schutsluis wordt dan als spuiniddel gebruikt en het theoretisch potentieel wordt :

$$E_{th} = P \cdot T = \frac{\rho g Q H}{1000} T \quad (\text{kWh}) \quad [3.2]$$

Met:

ρ = dichtheid van het water (kg/m^3)

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)

Q = debiet (m^3/s)

H = verval (m)

T = aantal uur per jaar (hr)

Als het verval over de sluis constant wordt verondersteld, dan hangt E_{th} alleen af van het debiet Q . Er wordt hierbij vanuit gegaan dat er continu water onttrokken kan worden aan het bovenpand en door de sluis en centrale naar het benedenpand afgevoerd. Het debiet door de sluis is in dit geval afhankelijk van de afmetingen van het vulsysteem.

Indien de traagheid in de omloopriolen wordt verwaarloosd kan vergelijking [3.2] ook geschreven worden (met $Q = \mu A \sqrt{2gH}$) als:

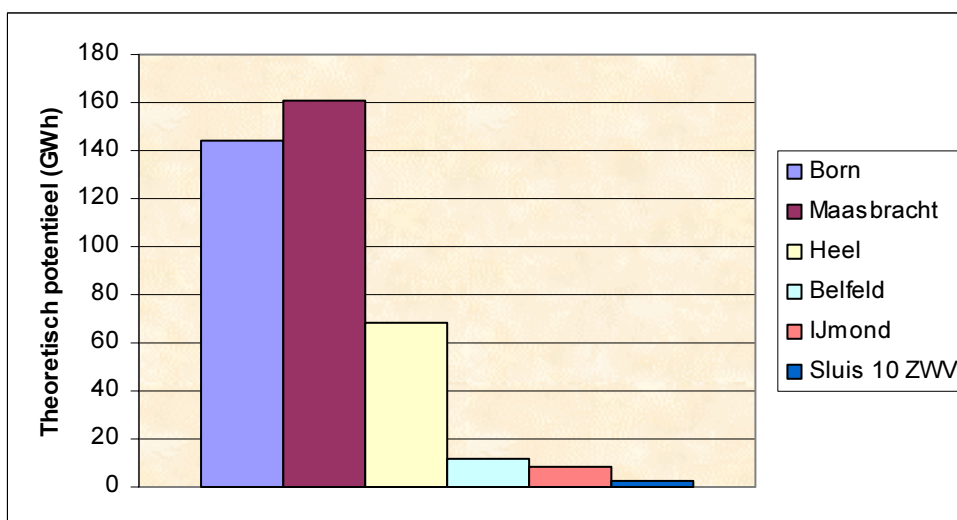
$$E_{th} = \frac{\rho g \mu A \sqrt{2gH}^{3/2}}{1000} T \quad (\text{kWh}) \quad [3.3]$$

Met:

μA = dwarsdoorsnede van de vulopeningen (m^2)

Het theoretisch potentieel is dus alleen afhankelijk van het verval over de sluis en de vulopeningen van het vulsysteem.

Voor alle locaties is het theoretisch potentieel berekend, zie figuur 3-1.



Figuur 3-1 Theoretisch potentieel onderzoekslocaties

3.2.2 Technisch potentieel

Het technisch potentieel (in kWh of MWh) is de maximale hoeveelheid energie die op een locatie te benutten is uit het schutten van schepen. In tegenstelling tot het theoretisch potentieel is hier geen sprake van continue energiewinning. Het technisch potentieel is afhankelijk van een groot aantal variabelen:

- Het (vul)debiet: in tegenstelling tot de berekening van het theoretisch potentieel is het debiet niet constant. Tijdens het vullen neemt het verval en dus het vuldebiet af.
- Het verval over de sluis: neemt af tijdens het nivelleren van de kolk.
- Het aantal draaiuren van de turbine: dit is afhankelijk van het aantal schutcycli (en dus van het aantal schepen dat geschut moet worden) en de duur van de schutcyclus.
- De capaciteit van het vulsysteem: de capaciteit heeft invloed op de duur van de cyclus en op het verloop en omvang van het vuldebiet
- Het turbinetype: op basis van het beschikbaar verval wordt een bepaald turbinetype gekozen met een bepaald rendement waardoor het theoretisch potentieel niet gehaald kan worden. Het rendement is, behalve van het verval, ook afhankelijk van het momentaan debiet door de turbine ten opzichte van het ontwerpdebiet: tijdens het nivelleren van de kolk neemt het debiet lineair af met de vultijd, uitgaande van een constante effectieve doorsnede van de vulopeningen. Het rendement van de turbine neemt hierdoor ook af, omdat turbines een optimaal rendement hebben bij een bepaald debiet. Een turbine met een vlakke rendementskromme verdient de voorkeur boven een turbine met een bepaald optimum en een laag rendement buiten dat optimum.
- Hydraulische verliezen: afhankelijk van de vormgeving van het vul/ledigsysteem. Hydraulische verliezen bestaan uit instroom en uitstroomb verliezen, wrijvingsverliezen, verliezen van valhoogte in bochten en vernauwingen en verlies van valhoogte bij krooshekken.

Het technisch potentieel bestaat dus uit een correctie van het theoretisch potentieel. De correctie bestaat uit het vermenigvuldigen van het theoretisch potentieel met het turbinerendement, hydraulische verliezen en het aantal schuttingen (draaiuren van de turbine) per jaar. De keuze voor een turbinetype wordt hier nog niet gemaakt, zodat het technisch potentieel vooralsnog afhankelijk wordt gesteld van het beschikbare, afnemende debiet, het (afnemend) verval, het type vul/ledigsysteem (bepaalt Q en vultijd) en de scheepvaartintensiteit (bepaalt aantal draaiuren van de turbine):

$$E_{tx} = \frac{\rho \cdot g \cdot n \cdot \eta_t \cdot \eta_h}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{vul}} Q(t) H(t) dt \quad (\text{kWh}) \quad [3.4]$$

Met:

n = aantal schuttingen per jaar	(-)
t = vultijd van de kolk	(s)
η_t = turbinerendement	(-)
η_h = rendement t.g.v. hydraulische verliezen	(-)
Q(t) = vuldebiet, functie van de vultijd	(m ³ /s)
H(t) = verval over de kolk, functie van de vultijd	(m)

Het turbinerendement staat in bovenstaande vergelijking buiten de integraal. Dit impliceert dat het rendement van de turbine tijdens het schutten constant blijft. Dit is niet het geval. Omdat tijdens het schutten het debiet door de turbine afneemt, daalt het rendement. Het rendement van de turbine hoort dus onder de integraal te staan. Omdat hier nog niet gekozen is voor een bepaald turbinetype wordt het rendement constant verondersteld, en voor elke locatie even groot.

De hydraulische verliezen worden eveneens constant verondersteld. Het water verliest energie door vormveranderingen (intree, bochten, vernauwingen, verwijdingen, uittree) en wandwrijving. Ook voor de hydraulische verliezen geldt dat deze afhankelijk zijn van de vultijd. Tijdens het heffen van de schuiven in de deuren of omloopriolen nemen de hydraulische verliezen onder de schuif af.

In tabel 3-1 zijn de verschillen tussen het theoretisch en technisch potentieel aangegeven:

Tabel 3-1 Verschillen theoretisch en technisch potentieel

	Theoretisch potentieel	Technisch potentieel
Verval	constant	neemt af tijdens nivelleren
Debiet	constant	neemt af tijdens nivelleren
Draaiuren van	onbeperkt (8760 hr/jaar)	beperkt, o.a. afh. van capaciteit vulsysteem en scheepvaart

turbine rendement 'kenmerk'	100 % spuien	< 100 % door turbine, hydraulische verliezen schutten
-----------------------------------	-----------------	--

Het technisch potentieel wordt nu met behulp van vergelijking [3.4] berekend.

Het turbinerendement wordt voor alle sluizen constant verondersteld: 0,85. Voor de vergelijking van de locaties onderling heeft dit geen effect.

De hydraulische verliezen worden voor alle sluizen constant verondersteld: 0,90. Dit betekent dat de netto beschikbare valhoogte aan de turbineas gelijk is aan 90% van de bruto valhoogte.

Van alle locaties is het aantal scheepspassages bekend. Er is echter niet bekend hoe vaak er geschut wordt. Voor de grote vrachtschepen mag verondersteld worden dat er geen andere schepen in de kolk liggen tijdens het schutten, terwijl het schutten van recreatievaart doorgaans met meerdere schepen tegelijk plaatsvindt. Ook bestaan de meeste complexen uit meerdere kolken. Voor het bepalen van het aantal schuttingen per jaar per kolk worden daarom de volgende aannamen gedaan:

- Het aanbod van schepen wordt evenredig verdeeld over het aantal sluizen in het complex
- Per schutting 2 schepen in de kolk

Op basis van deze aannamen is in tabel 3-2 het aantal schuttingen per jaar per kolk berekend.

Tabel 3-2 Aantal schuttingen

	Aantal kolken	Aantal schepen (2001)		Aantal schuttingen (per kolk)	
		totaal	opschuttend	totaal	opschuttend
Born	3	31.585	14.963	5.264	2.494
Maasbracht	3	32.524	15.178	5.421	2.530
Heel	2	38.515	32.524	9.629	8.131
Heel ¹⁾	3	38.515	18.201	6.419	3.034
Belfeld	3	40.588	18.342	6.765	3.057
IJmond	4	65.396	32.718	8.175	4.090
IJmond ¹⁾	5	65.396	32.718	6.540	3.272
Sluis 10 ZWV ²⁾	1	9.737	5.655	4.869	2.828

1) Uitgaande van de bouw van de nieuwe kolken in Heel en IJmuiden, gelijkblijvend aantal schepen

2) Cijfers gebaseerd op het telpunt bij sluis 13

Bij deze vereenvoudiging wordt verondersteld dat elke kolk evenveel schepen schut. Voor alle locaties, met uitzondering van IJmuiden, is dit een geldige vereenvoudiging, omdat de afmetingen van de kolken in dezelfde orde van grootte liggen. De afmetingen van de sluizen in IJmuiden zijn niet van dezelfde orde van grootte. In de kleine sluizen kunnen de grootste schepen niet geschut worden, zodat er een onderscheid gemaakt moet worden naar kolk en scheepsgrootte in de toekomstige situatie. Alle recreatievaartuigen zullen in de kleinere kolken geschut worden (m.u.v. cruiseschepen), de grootste vrachtschepen zullen door de toekomstige grote sluis worden geschut. Voorlopig echter zal de verdeling uit tabel 3-2 aangehouden worden. Het aantal schuttingen valt voor IJmuiden (6540 per jaar per sluis) niet veel hoger of lager uit dan bij de andere sluizen, zodat voor een eerste berekening dit getal gebruikt zal worden.

Voor alle locaties zijn de variabelen voor de integraal in vergelijking [3.4] nu bekend. Het is nu van belang om het verval en debiet door de sluis als functie van de nivelleertijd te bepalen. Hiervoor is het programma LOCKFILL uitermate geschikt. Aan de hand van het type vulsysteem, kolkafmetingen, verval en een aantal (afvoer)coëfficiënten wordt met dit programma de vultijd berekend, alsmede de waterstand in de kolk en het vuldebet als functie van de tijd. Ook de langskracht op de in de kolk afgemeerde schepen ten gevolge van het vuldebet wordt berekend. In bijlage B zijn de invoer en uitvoer van de LOCKFILL-berekeningen opgenomen. Deze berekeningen zijn voor alle locaties uitgevoerd. In het programma is met een tijdstap van 2 seconden gerekend. De integraal van vergelijking [3.4] wordt nu dus een sommatie van alle debieten en vervallen gedurende een tijdsduur van 2 seconden:

$$E_{tx} = \frac{\rho \cdot g \cdot n \cdot \eta_{turb} \cdot \eta_{hydr}}{1000} \sum_{t=0}^{t=t_{vul}} Q \cdot H \cdot \Delta t \quad (\text{kWh}) \quad [3.5]$$

Met:

$$\Delta t = 2 \text{ sec} = 2/3600 \text{ hr.}$$

In tabel 3-3 zijn de resultaten van deze berekeningen samengevat.

Tabel 3-3 Energieopbrengst onderzoekslocaties

	E (cyclus) (kWh)	E (jaar) (MWh)		P _{max} (kW)	P _{gem} (kW) = E/8760		Belastingfactor (%)	
		Totaal	opschut.		totaal	opschut.	totaal	opschut.
Born	324	1.705	808	3.446,2	194,7	92,2	5,7	2,7
Maasbracht	366	1.984	926	3.832,5	226,5	105,7	6,0	2,8
Heel	136	873	413	1.377,9	99,7	47,1	7,2	3,4
Belfeld	29	193	87	276,8	22,0	9,9	8,0	3,6
IJmond	42	275	137	286,2	31,4	15,7	11,0	5,5
Sluis 10	3	13	8	56,9	1,5	0,9	2,6	1,5

De belastingfactor in tabel 3-3 is gedefinieerd als de verhouding tussen de jaarlijkse energieproductie (E) en het product van piekvermogen (P_{max}) en aantal uren per jaar (8760 uur):

$$f = \frac{E}{8760 \cdot P_{\max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad [3.6]$$

De belastingfactor geeft aan in hoeverre gebruik gemaakt wordt van de totale geïnstalleerde capaciteit van de centrale. De belastingfactor is voor alle locaties erg laag. Dit betekent dat de centrale niet efficiënt benut wordt.

3.3 Locatiekeuze

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk zijn de criteria gegeven waarop de keuze voor een bepaalde locatie gemaakt zal worden. Deze criteria worden hier herhaald:

- Verval
- Waterhuishouding en debiet
- Sluisontwerp
- Scheepvaart
- Theoretisch en technisch potentieel

In de voorgaande paragraaf zijn het theoretisch en technisch potentieel bepaald voor de onderzoekslocaties. Het verval, de waterhuishouding, de watertoevoer, het sluisontwerp en de scheepvaart zijn alle indirecte selectiecriteria die bij het bepalen van het potentieel van belang zijn. De keuze voor een locatie zal dan ook uitsluitend gebaseerd worden op het berekende potentieel van de locaties.

Uit figuur 3-1 en tabel 3-3 kan geconcludeerd worden dat locatie Maasbracht het meest in aanmerking komt voor nadere uitwerking. Het theoretisch potentieel van een locatie is met name afhankelijk van het verval op die locatie. Maasbracht heeft van alle onderzoekslocaties het grootste verval en dus ook het grootste theoretisch potentieel.

Ook het technisch potentieel is in Maasbracht het grootst. Uit tabel 3-3 volgt dat bij de sluis te Maasbracht naar verwachting bijna 2 GWh elektriciteit gewonnen kan worden, uitgaande van energiewinning tijdens het vullen en ledigen van de kolk. In vergelijking met de referentieprojecten, zie bijlage A, is dit resultaat vrij goed. Onderstaand overzicht geeft de energieopbrengst van de drie beste onderzoekslocaties (Born, Maasbracht, Heel) in vergelijking met de opbrengst van de referentieprojecten (tussen haakjes de opbrengst van energiewinning door alleen opschuttende schepen; energiewinning alleen tijdens vullen van de kolk).

Tabel 3-4 Energieopbrengst van diverse locaties

Locatie	Jaarlijkse energieopbrengst (GWh)
Born	1,7 (0,8)
Maasbracht	2,0 (0,9)
Heel	0,9 (0,6)
Lozen	0,8
Bocholt	0,5
Barton Locks	3,2

Er zal dus gekozen worden voor de locatie Maasbracht voor het maken van een voorlopig ontwerp. Als deze locatie rendabel blijkt, is het verstandig om ook de locatie in Born nader te onderzoeken. De jaaropbrengsten van deze locaties zijn namelijk vrijwel gelijk.

Uitgaande van een gemiddeld jaarverbruik van een huishouden van 3,5 MWh, kan de sluis bij Maasbracht in de energiebehoefte van ongeveer 265 huishoudens voorzien, de sluis bij Born kan naar verwachting ongeveer 230 huishoudens van energie voorzien, uitgaande van uitsluitend energiewinning tijdens het vullen van de kolk (opschutten van schepen).

3.4 Literatuur

- {3.1} Duivendijk, J. van., *Energiewaterbouwkunde*. TUDelft: collegedictaat CT5304, maart 2002.
- {3.2} *Zandmaas/Maasroute Ontwerp Tracé Besluit - scheepvaart en kunstwerken*. Maastricht: Rijkswaterstaat, april 2001.
- {3.3} *Vervanging sluizen 10 t/m 13 Zuid-Willemsvaart, voorontwerpnota sluis 11 en 13*. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, oktober 1999.
- {3.4} *Trajectnota/MER Zeepoort IJmond, achtergronddocument alternatieven en varianten*. Haarlem: Rijkswaterstaat directie Noord-Holland, oktober 2001.
- {3.5} *Hydro-electric Generating Station Built within a Canal Lock System*. Technical brochure No. 81. CADDET Renewable Energy, 1998.
- {3.6} *Van voedingsgracht tot groene kracht*. Waterspiegel, infomagazine van het Departement Leefmilieu en Infrastructuur, nummer 6, 2000.

4 Schutsluizencomplex Maasbracht

In de eerste twee paragrafen van dit hoofdstuk worden de ligging respectievelijk de vormgeving van het sluizencomplex Maasbracht behandeld. In de laatste paragraaf wordt het huidige ontwerp voor de kolkverlenging gepresenteerd.

4.1 Het Julianakanaal

4.1.1 Beschrijving

In 1921 is besloten tot de aanleg van het Julianakanaal, nadat overleg met België over de kanalisatie van de Maas tussen Eysden en Maasbracht op niets was uitgelopen. Het Julianakanaal moet dus gezien worden als voortzetting van de Maaskanalisisatie (1920-1930) tussen Grave en Maastricht. In eerste instantie werden vier sluiscomplexen aangelegd; bij Limmel, Born, Roosteren en Maasbracht. De sluis bij Roosteren is bij de modernisering van het kanaal in de jaren zestig komen te vervallen.

De schutsluizen bij Limmel vormen de zuidelijke toegang tot het kanaal, het sluizencomplex bij Maasbracht markeert het noordelijke uiteinde van het kanaal. Het Maastraject tussen de stuw bij Borgharen en Maasbracht heeft een waterafvoerende functie en is uitsluitend voor recreatievaart toegankelijk, de beroepsvaart wordt door het Julianakanaal geleid. In figuur 4-1 is de stuw bij Borgharen te zien, met links daarvan de schutsluis voor recreatievaart en linksboven de toegang tot het Julianakanaal.

Figuur 4-1 Stuw Borgharen, gezien in zuidelijke richting



De sluizen bij Limmel staan gedurende het grootste deel van het jaar open (geen verval aanwezig) en worden slechts bij hoog water gesloten. Het peil in het pand Limmel-Born wordt dus, met uitzondering van de periode dat de sluis gesloten is, beheerst door de stuw Borgharen.

Over een lengte van 33 km overwint het kanaal in twee trappen een hoogteverschil van 23,35 meter: bij Born is het verval 11,25 meter, bij Maasbracht is dat 12,10 meter.

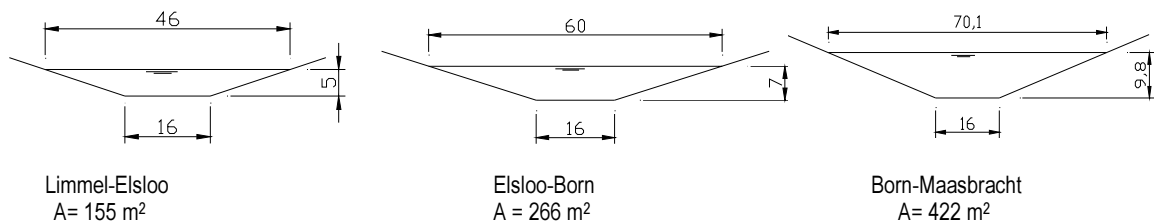
4.1.2 Functie

Zoals al in paragraaf 4.1.1 naar voren is gekomen, is de hoofdfunctie van het Julianakanaal het vormen van een bevaarbare verbinding tussen Limmel (bij Maastricht) en Maasbracht (ten zuiden van Roermond).

4.1.3 Technische gegevens

Dwarsprofiel

Het dwarsprofiel van het kanaal is niet overal hetzelfde. Er worden drie verschillende profielen onderscheiden; van Limmel tot de bocht in het kanaal bij Elsloo, het traject na de bocht tot de sluizen bij Born en het traject tussen de sluizencomplexen van Born en Maasbracht, zie figuur 4-2.



Figuur 4-2 dwarsprofielen Julianakanaal

Bodem en oeverbekleding

Omdat de ondergrond van het gedeeltelijk in ophoging liggende kanaal hoofdzakelijk uit grind en grof zand is opgebouwd (en dus erg waterdoorlatend), zijn voor de waterafdichting de bodem en oevers van het kanaal bekleed met een kleilaag, met daaronder nog een asfaltbetonlaag van 5 cm dik.

Scheepvaart capaciteit

Het Julianakanaal is in de huidige vorm toegankelijk voor scheepvaart t/m klasse Va. Dit moet in de toekomst worden uitgebreid tot klasse Vb: tweebakduwvaart (lange configuratie) met een lengte van 175 m, breedte 11,4 m en diepgang 3,5 m (75% beladingsgraad).

4.2 Bestaande situatie sluizencomplex

4.2.1 Beschrijving complex

Bij de aanleg van het Julianakanaal is bij Maasbracht één sluis gebouwd met een nuttige kolklengthe van 136 m, een kolkbreedte van 14 m en een diepgang van 3,3 m. Het verval over deze sluis bedroeg 7,45 m. Door het wegvallen van de sluis te Roosteren, nam het verval bij Maasbracht toe tot bijna 12 m. In bijlage C1 is de toegenomen diepte in het bovenpand van Maasbracht aangegeven. Omdat de oude sluis dit verval niet kon keren is besloten om deze sluis af te breken en daarvoor in de plaats drie nieuwe sluisen te bouwen. Deze drie identieke sluisen hebben alle een nuttige kolklengthe van 142 m, een nuttige kolkbreedte van 16 m en een diepte op de drempel (in het benedenhoofd) van 4 m. Over de benedenhoofden van de drie sluisen ligt een vaste wegverbinding die Stevensweert met Maasbracht verbindt.

Ten oosten van de oostkolk ligt een gemaal om in droge perioden water uit de Maas terug te pompen in het kanaal teneinde schutverliezen te beperken. De bebouwing van het dorp Maasbracht begint 100 m ten oosten van de oostkolk. In figuur 4-3 is het complex te zien vanaf het Julianakanaal met uiterst links de westkolk en rechts de oostkolk. Rechts van de oostkolk is de uitstroming van het gemaal in het kanaal zichtbaar. Voor een overzicht van het complex wordt verwezen naar bijlage C.

Figuur 4-3 Sluizencomplex Maasbracht, zicht vanaf het Julianakanaal

4.2.2 Technische gegevens

Lay-out van het complex



Het sluizencomplex vormt de overgang tussen het Julianakanaal (bovenpand) en de Maas (benedenpand).

De lengte van het complex, inclusief voorhavens en remmingwerken, is 1 km lang van kanaalkilometer 33.500 tot 34.500.

Peilen

Waterstand bovenpand:	NAP + 32,65 m
Waterstand benedenpand:	NAP + 20,80 m

Sluisplateau:	NAP + 34,60 m
Bovenkant bodembescherming bovenpand:	NAP + 24,25 m
Bovenkant kolkvloer:	NAP + 16,80 m
Bovenkant woelkelder:	NAP + 24,75 m

Afmetingen

Nuttige kolklengthe:	142 m
Vrije doorvaartbreedte kolk en sluishoofd:	16 m
Diepte op de drempel:	4,0 m
H.o.h. afstand oostkolk en middenkolk:	29,20 m
H.o.h. afstand westkolk en middenkolk:	47,50 m

Vul/ledigsysteem

Het vulsysteem van de sluizen bestaat uit twee omloopriolen (lengte 24 m) met woelkelder in het bovenhoofd. Om de energievernietiging te bevorderen zijn de vulstralen in de woelkelder naar elkaar toe gericht. De woelkelder is voorzien van breekbalken om de energie van het binnenstromende water te vernietigen. De omloopriolen zijn voorzien van schuiven die de kolk van het bovenpand kunnen afsluiten.

Kleinste dwarsprofiel omloopriolen: breedte x hoogte = 2,50 m x 3,35 m

De afmetingen van dit systeem zijn zodanig dat de sluis binnen een bepaalde vereiste tijd genivelleerd kan worden.

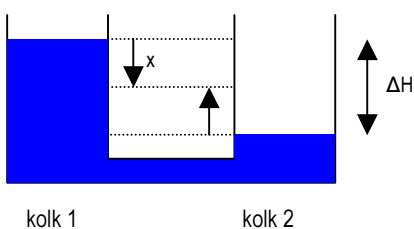
in bijlage C4 is een aantal doorsneden van het vulsysteem opgenomen.

Het ledigen van de kolk vindt eveneens plaats door omloopriolen. De uitstroomopeningen in het benedenhoofd zijn zodanig vormgegeven dat in de benedenvoorhaven het uitstromende water in stralen tegen elkaar botst om energievernietiging te bevorderen.

Waterspaarsysteem

De tweelingsluizen (oostkolk en middenkolk) zijn uitgerust met een hevelsysteem, zie figuur 4-4. In droge perioden kan met dit systeem water van de ene naar de andere kolk overgeheveld worden.

Figuur 4-4 Hevelsysteem



In de huidige situatie geldt voor het overhevelen:

$$A_1 x = A_2 (\Delta H - x) \quad [4.1]$$

Met:

A_1 = kolkoppervlak kolk 1 (m^2)

A_2 = kolkoppervlak kolk 2 (m^2)

en dus:

$$x = \frac{A_2 \Delta H}{A_1 + A_2} \quad (\text{m}) \quad [4.2]$$

Omdat geldt $A_1 = A_2$, geldt dat $x = \frac{1}{2} \Delta H$

Per cyclus (1 opschuttend schip, 1 afschuttend) geldt nu dat het schutverlies ΔV gelijk is aan $\Delta H \cdot A_1 = \Delta H \cdot A_2$. Immers: de helft van de schutscijf van kolk 1 wordt overgeheveld naar kolk 2, de andere helft gaat verloren naar de Maas. Voor kolk 2 geldt dat de helft van de schutscijf uit het kanaal wordt onttrokken, de andere helft komt uit kolk 1.

Waterspaarsysteem in de nieuwe situatie:

Voor het hevelen van kolk 1 naar kolk 2 geldt wederom, maar nu met $A_2 > A_1$:

$$x = \frac{A_2 \Delta H}{A_1 + A_2} \quad (\text{m}) \quad [4.3]$$

Het waterverlies is nu gelijk aan:

$$\Delta V = (\Delta H - x) \cdot (A_1 + A_2) \quad (\text{m}^3) \quad [4.4]$$

Als van kolk 2 (verlengde kolk) naar kolk 1 geheveld wordt, zal x kleiner zijn: x' .

$$x' = \frac{A_1 \Delta H}{A_1 + A_2} \quad (\text{m}) \quad [4.5]$$

en het totale waterverlies wordt

$$\Delta V = (\Delta H - x') \cdot (A_1 + A_2) \quad (\text{m}^3) \quad [4.6]$$

Het maakt dus uit of er van de grote kolk naar de kleine kolk wordt geheveld, of omgekeerd.

Het gemiddelde waterverlies wordt: $\Delta H \cdot \frac{1}{2} (A_1 + A_2)$.

Bij het overhevelen is wel van belang dat de beide kolken op elkaar afgestemd zijn in het schutbedrijf. In drukke perioden is dit niet altijd mogelijk en wordt het schutverlies groter. In de zomer wordt het besparen van water als zeer belangrijk beschouwd.

Indien de centrale in de midden- of oostkolk wordt geïntegreerd zal het waterspaarsysteem maar voor de helft gebruikt kunnen worden. De verlengde kolk zal immers volledig door water uit het bovenpand gevuld worden. Er kan wel water overgeheveld worden naar de onveranderde gekoppelde kolk.

4.3 Geplande ingreep in het sluizencomplex

4.3.1 Project Maasroute

Het project Maasroute is erop gericht de Maas en bijbehorende scheepvaartkanalen op te waarderen tot een klasse Vb vaarroute. Onder de Maasroute maatregelen vallen zowel de aanpassing van diverse kunstwerken op de route als peilopzet op een aantal stuwpanden om de vaardiepte te vergroten. Voor het sluizencomplex te Maasbracht betekent dit dat de oostkolk verlengt wordt tot 210 m. Het peil in het bovenpand wordt met 0,25 m verhoogd om voldoende vaardiepte voor klasse Vb scheepvaart te creëren.

4.3.2 Onderdelen van de ingreep

Kolkverlenging

In hoofdlijnen bestaat het huidig ontwerp van de kolkverlenging uit de volgende punten:

- Slopen van het bestaande bovenhoofd en herinrichten als kolkmoet
- Bouw van kolkmoet met een lengte van 43 m.
- Bouw van een nieuw bovenhoofd, identiek aan het bestaande bovenhoofd
- Verleggen van de bodembescherming in het bovenpand
- Aanpassen en verlengen van geleidewerken en wachtplaatsen

Een bovenaanzicht en doorsneden van het ontwerp van de kolkverlenging zijn opgenomen in bijlage D.

Peilopzet

Het maximumpeil op het bovenpand wordt met 0,25 m verhoogd van NAP + 32,85 m. tot NAP + 33,10 m. Het nieuwe streefpeil van het bovenpand wordt NAP + 32,90 m.

Als gevolg van de verhoging van de waterstand in het bovenpand wordt het sluizencomplex als volgt aangepast:

- Het sluisplateau van het verlengde deel van de oostkolk (bovenhoofd en kolkmoet) komt op 2,5 m boven het nieuwe ontwerppeil te liggen, dus op NAP + 35,60 m.
- Het sluisplateau van de bestaande sluizen komt 1,5 m boven het nieuwe ontwerppeil te liggen, dus op NAP + 34,60 m.

4.3.3 Uitvoering van de kolkverlenging

Het nieuwe bovenhoofd en de kolkmoet zullen pneumatisch worden afgezonken. In het bovenpand zal hiervoor een grond dam worden aangebracht tussen de geleidewerken van de oostkolk. Op deze manier wordt het deel van het bovenpand waar de verlengde kolk en het nieuwe bovenhoofd gebouwd zullen worden, droog gezet. De kolkmoet en het bovenhoofd worden vervolgens op 'maaiveld' niveau gebouwd en pneumatisch afgezonken tot de vereiste diepte.

Het gevolg van deze methode van uitvoering op het ontwerp van het bovenhoofd is de aanwezigheid van snijranden onder de constructie. Tussen deze snijranden wordt de grond onder overdruk ontgraven om het binnendringen van grondwater te voorkomen. De constructie zakt door het ontgraven tot de vereiste diepte.

4.3.4 Gevolgen van de ingreep voor de scheepvaart

Door het verlengen van de kolk neemt het kolkoppervlak met circa 50% toe. Het ontwerp van het nieuwe bovenhoofd is echter hetzelfde als het bestaande bovenhoofd. Omdat er geen capaciteitsuitbreiding plaatsvindt, zal ook de schutduur toenemen. In het volgende hoofdstuk zal hier meer aandacht aan worden besteed.

4.4 Literatuur

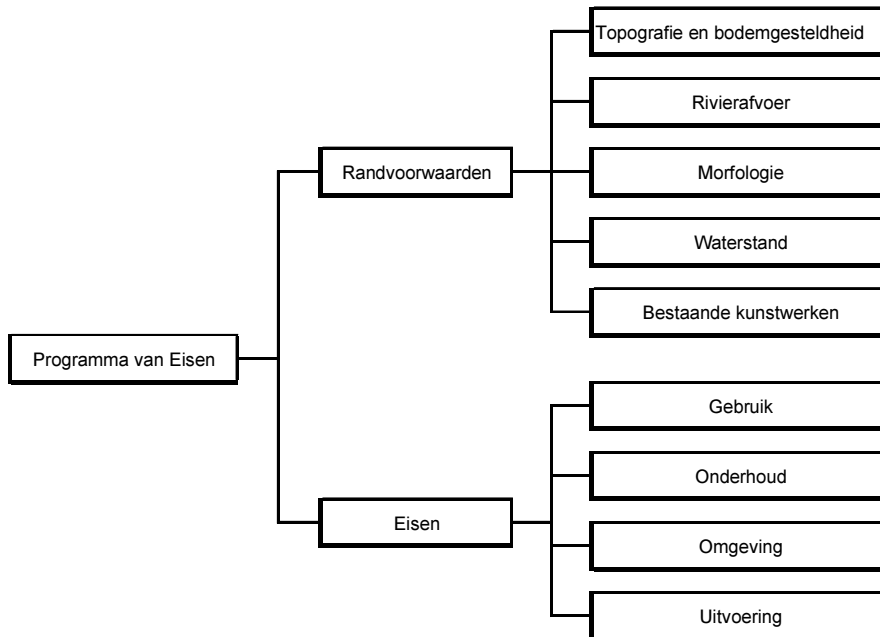
- {4.1} Jadoenathmisier, G.A., *Waterkracht uit het Julianakanaal*. Delft: afstudeerrapport TUDelft, 1985.
- {4.2} Eindrapport complex Maasbracht, project Zandmaas/peilopzet. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, januari 2000.

5 Programma van Eisen sluiscentrale Maasbracht

In dit hoofdstuk worden de eisen en randvoorwaarden gepresenteerd waaraan het ontwerp van de sluiscentrale zal moeten voldoen.

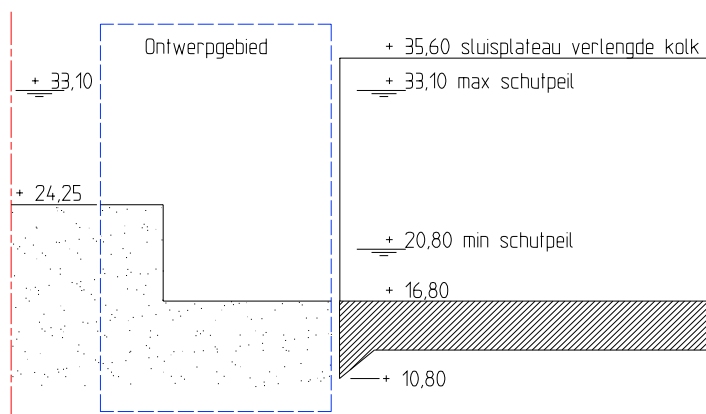
5.1 Inleiding

Het Programma van Eisen (PvE) voor de sluiscentrale omvat randvoorwaarden en eisen. In figuur 5-1 is de structuur van het PvE duidelijk gemaakt.



Figuur 5-1 PvE structuur

Het Programma van Eisen zoals gegeven in bovenstaande figuur is van toepassing op het ontwerpgebied voor de centrale. Dit gebied is weergegeven in figuur 5-2.



Figuur 5-2 Ontwerpgebied sluiscentrale (peilen in meters t.o.v. NAP)

Het ontwerpgebied betreft de aansluiting van de centrale op de omgeving, dus de overgang tussen het bovenpand (links in figuur 5-2) en de verlengde kolk (rechts in de figuur). De centrale zal dus binnen dit gebied worden ontworpen.

5.2 Randvoorwaarden

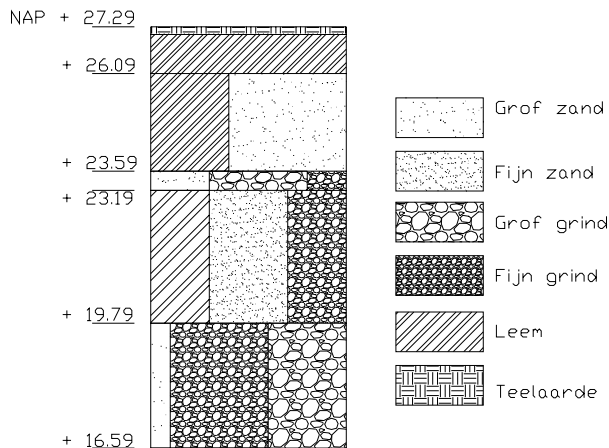
5.2.1 Topografie en bodemgesteldheid

Bodemniveau bovenpand: NAP + 24,25 m

Van de topografie van de omgeving is alleen het bodemniveau van het bovenpand van directe invloed op het ontwerp van de centrale. In de huidige situatie ligt de bovenkant van de bodembescherming voor de kolken op NAP + 24,25 m. Deze waarde wordt aangehouden als bodemniveau van het bovenpand.

Ter plaatse van de bestaande bovenhoofden van het complex is de opbouw van de ondergrond als volgt:

Figuur 5-3 Boorprofiel bovenpand Maasbracht



Omdat het bestaande sluiscomplex op staal gefundeerd is, wordt de bodem voldoende draagkrachtig verondersteld voor de sluiscentrale.

Maximale grondwaterstand: NAP + 25,0 m

Gemiddelde grondwaterstand: NAP + 21,0 m

Minimale grondwaterstand: NAP + 18,0 m

5.2.2 Rivierafvoer

Voor de bepaling van de rivierafvoer wordt gebruik gemaakt van de in figuur 3-1 gegeven afvoerduurlijn. Omdat het Julianakanaal geen waterafvoerende functie heeft, zal al het water door de Grensmaas worden afgevoerd. Om schutverlies uit het kanaal te compenseren wordt in de zomer een beperkt debiet op het kanaal gelaten. Ook wordt door het gemaal te Maasbracht water uit de Maas in het kanaal gepompt.

In verband met recreatie en het voorkomen van droogvallen moet altijd minimaal 10 m³/s door de Grensmaas worden afgevoerd. Het overige water kan t.b.v. energiewinning op het kanaal gelaten worden. Deze waterverdeling wordt door de stuw te Borgharen gerealiseerd.

In dit onderzoek zal uitgegaan worden van een maximaal toelaatbaar debiet op het kanaal van 75 m³/s. Dit getal is gebaseerd op de maximaal toelaatbare stroomsnelheid op het kanaal (0,5 m/s, richtlijn CVB, Commissie Vaarweg Beheerders) en het kleinste dwarsprofiel (155 m², traject Limmel-Elsloo):

$$Q = A \cdot u = 155 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m/s} = 77,5 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad [5.1]$$

In het verdere verloop zal veiligheidshalve uitgegaan worden van 75 m³/s.

5.2.3 Morfologie

Het kanaal is met een waterdichte laag afgesloten van de omgeving. De reden hiervoor is de grote doorlatendheid van de ondergrond (grind, grof zand) en het feit dat het kanaal gedeeltelijk in ophoging ligt. Bij de aanleg is voor de waterafdichting gebruik gemaakt van een kleilaag, met daarboven een grindlaag om de klei te beschermen. Bij de verbreding van bepaalde kanaaltrajecten is gebruik gemaakt van asfalt voor de waterdichte afsluiting, met daarbovenop weer een grindlaag.

De in paragraaf 5.2.2 gegeven stroomsnelheid is zo klein dat er geen sprake is van sedimenttransport (zoals grind dat de turbine zou kunnen beschadigen). Er zal dus geen zandvang voor de turbine gebouwd hoeven worden. Voor de bescherming van vis zal wel een rek voor de instroomopeningen van de turbine geplaatst moeten worden.

5.2.4 Waterstanden

In de nieuwe situatie, na kolkverlenging en peilopzet, moet uitgegaan worden van onderstaande peilen:

Beheerspeil bovenpand	NAP + 32,90 m
Ontwerppeil bovenpand ¹	NAP + 33,10 m
Beheerspeil benedenpand	NAP + 20,80 m

Alle peilen zijn constant. Het bovenpand ligt tussen twee sluiscomplexen (Born en Maasbracht). Het waterpeil in het benedenpand wordt gereguleerd door de stuw bij Linne.

5.2.5 Bestaande kunstwerken

Bij het maken van een ontwerp moet rekening gehouden worden met de bestaande sluizen in het complex. Onderstaande is een overzicht van de directe omgeving van het ontwerp voor een nieuw sluishoofd, zie ook figuur 4-3.

Sluiskolk

Het sluishoofd moet aansluiten op de verlengde kolkmoot. De afmetingen en vormgeving van de verlengde kolk zijn weergegeven in bijlage D.

Afstand tussen de sluizen

De as van de middenkolk ligt 29,2 m uit de as van de oostkolk. Beide kolken hebben een dagwijdte van 16 meter; het sluseiland is dus 13,2 m breed.

Het eiland tussen de westkolk en middenkolk is 31,5 m breed; de as van de westkolk ligt dus 47,5 m ten westen van de as van de middenkolk.

Aangrenzend terrein

Ten westen van de westkolk ligt de weg die Stevensweert met Maasbracht verbindt. Tussen de westkolk en deze weg ligt een groenstrook van circa 20 m breed.

Ten oosten van het complex ligt het gemaal. Tussen de uitstroom van dit gemaal en de oostkolk ligt een groenstrook van ongeveer 50 m breed.

5.3 Gebruikseisen

In figuur 5-1 is te zien dat de eisen betrekking hebben op gebruik, onderhoud, omgeving en uitvoering van de centrale.

De gebruikseisen hebben betrekking op de vijf hoofdfuncties van de schutsluis met centrale: scheepvaart doorlaten, water keren, water doorlaten, kruising droge infrastructuur en energiewinning.

¹ Het ontwerppeil is gelijk aan het beheerspeil plus 0,20 m toeslag voor translatiegolven, windgolven en windopzet.

5.3.1 Levensduur

Civiele componenten: minimaal 80 -100 jaar
 Werktuigbouwkundige componenten: minimaal 50 jaar
 Elektrotechnische componenten: minimaal 20 jaar

Met betrekking tot de elektrotechnische componenten geldt wel dat bepaalde onderdelen meer onderhoud behoeven dan andere, en ook eerder vervangen zullen worden. Voor de generator geldt echter dezelfde levensduur als voor de werktuigbouwkundige componenten.

5.3.2 Scheepvaart

Capaciteit

Het totale sluizencomplex moet voldoende capaciteit hebben om de scheepvaart voldoende veilig en vlot te schutten, zonder lange wachttijden voor de scheepvaart. In 2001 passeerden in totaal 32.524 schepen de sluizen bij Maasbracht.

Waterdiepte op drempel sluis

Diepgang klasse Vb scheepvaart, 75% beladingsgraad:	3,50 m
Vrijboord (CVB):	0,70 m +
Benodigde waterdiepte op drempel:	4,20 m

In het benedenhoofd is maar 4,0 m waterdiepte beschikbaar. De sluis is echter wel breder dan geëist door de CVB (Commissie Vaarweg Beheerders), zodat het natte profiel voldoende ruim is voor het vlot invaren en uitvaren. Voor het bovenhoofd zal wel uitgegaan worden van de vereiste 4,20 m waterdiepte.

Beschikbaarheid sluizencomplex

Voor het sluizencomplex van Maasbracht geldt een vereiste beschikbaarheid van 95%. Dit betekent dat gedurende de openingstijden van de sluis (tabel 5-1) de sluis gedurende maximaal 5% van de tijd gesloten is voor de scheepvaart. Dit heeft betrekking op alle kolken afzonderlijk.

Tabel 5-1 Beschikbaarheid voor scheepvaart sluizencomplex Maasbracht

dag	ma	di	wo	do	vr	za	zo
open	6-24	0-24	0-24	0-24	0-24	0-20	9-17

De sluizen zijn alleen zaterdagavond vanaf 20:00 tot zondagochtend 9:00 en zondagavond vanaf 17:00 tot maandagochtend 6:00 gesloten voor scheepvaart. Dit zijn dus 2 perioden van 13 uur. Indien de verlengde kolk ook op de zondag gesloten blijft voor scheepvaart, kan door spuien gedurende 34 uur continu energie gewonnen worden, mits er bovenstrooms voldoende water aangevoerd kan worden.

Schutduur

Voor de scheepvaart vormt een schutsluis een obstakel in de vaarweg. Om het tijdverlies zoveel mogelijk te beperken, moet de schutcyclus zo kort mogelijk gehouden worden. Één schutcyclus bestaat uit de volgende componenten, met daarachter de waarde van de componenten voor de sluizen te Maasbracht:

- | | |
|---|----------|
| a) invaren opschuttend schip/schepen | variabel |
| b) sluiten deuren benedenhoofd | 1 min |
| c) vullen kolk door omloopriolen in het bovenhoofd | 10 min |
| d) openen deuren bovenhoofd | 1 min |
| e) uitvaren opschuttend schip/schepen | variabel |
| f) invaren afschuttend schip/schepen | variabel |
| g) sluiten deuren bovenhoofd | 1 min |
| h) ledigen kolk door omloopriolen in het benedenhoofd | 8 min |
| i) openen deuren benedenhoofd | 1 min |
| j) uitvaren afschuttend schip/schepen | variabel |

In dit onderzoek kunnen uitsluitend de onderdelen c, d en g beïnvloed worden, waarbij het met name om onderdeel c gaat. Het bovenhoofd biedt plaats aan de bewegingswerken voor het openen en sluiten van de deuren. In het ontwerp kan dan de afweging gemaakt worden of de oude bewegingswerken worden hergebruikt, of dat een nieuw systeem wordt geïnstalleerd met een groter vermogen. De benodigde tijd voor het openen en sluiten van de deuren kan dan bekort worden. Dit is echter al zo kort, dat het installeren van een nieuw

bewegingswerk nauwelijks een verkorting van de totale schutcyclus zal opleveren. Dit zal daarom ook niet verder worden overwogen.

De benodigde tijdsduur voor het invaren en uitvaren is sterk afhankelijk van de grootte van de schepen en het aantal schepen dat per keer geschut kan worden: het invaren van vier kleinere schepen duurt langer dan het invaren van een groter schip. Als wordt aangenomen dat het invaren en uitvaren ongeveer 5 min duurt, bedraagt de gehele schutcyclus circa 45 min.

In het Eindrapport Complex Maasbracht – project Zandmaas/peilopzet (literatuur {5.2}) is berekend dat als gevolg van de geplande kolkverlenging, de schutcyclus met ongeveer 50 % zal toenemen. In dit rapport zijn echter geen maatregelen genoemd (vergroting capaciteit vulsysteem) om de verlengde schutduur te compenseren. Voor de berekening van de vul- en leeglooptijd gelden de volgende vergelijkingen:

$$Q = \mu A \sqrt{2gz} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad [5.2]$$

en

$$Q = -A_k \frac{dz}{dt} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad [5.3]$$

Met:

μA = effectieve doorsnede vulopening (m^2)

A_k = kolkoppervlak (m^2)

z = momentaan verval (m)

Eliminatie van Q uit bovenstaande vergelijkingen levert:

$$A_k \frac{dz}{dt} + \mu A \sqrt{2gz} = 0 \quad [5.4]$$

Als bovenstaande differentiaalvergelijking wordt opgelost, volgt voor de vultijd van de kolk:

$$t = \frac{A_k}{\mu A} \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}} \quad (\text{s}) \quad [5.5]$$

Met:

H = totaal bruto verval (m)

Hieruit blijkt dat de toename van de leeglooptijd (en vultijd) evenredig is met de toename van het kolkoppervlak. Voor het legen van de kolk (kolkoppervlak neemt door verlenging met ongeveer 50% toe) kan dan uitgegaan worden van $8 \cdot 1,5 = 12$ min, voor het vullen kan uitgegaan worden van $10 \cdot 1,5 = 15$ min. De totale duur van een schutcyclus zal dus met 9 min. toenemen tot ongeveer 54 min. Wat voor dit onderzoek vooral van belang is, is de 'toelaatbare' verlengde vulduur van 15 min i.p.v. de huidige 10 min. Voor de energiewinning biedt dit wellicht mogelijkheden voor de beïnvloeding van het vulprogramma. Er zal dus uitgegaan worden van een maximaal toelaatbare vulduur van 15 min.

NB: vergelijking [5.5] is geldig bij een oneindig snel geheven schuif. Omdat de schuif een eindige hefsnelheid heeft, zal de werkelijke vul/ledigtijd groter zijn.

Verticale snelheid wateroppervlak in kolk

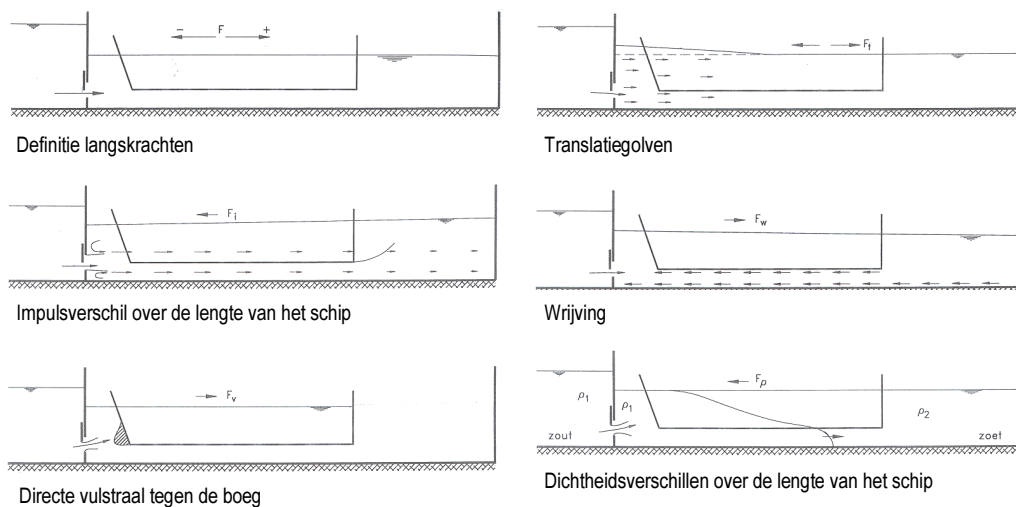
Indien gebruik gemaakt wordt van vaste bolders in haalkommen mag de verticale snelheid van het kolkoppervlak niet groter zijn dan $v_{\max} = 1 \text{ m/min}$. In de sluisgolven zijn echter drijvende bolders aangebracht, zodat met deze eis geen rekening gehouden hoeft te worden.

Langskracht

De langskracht op afgemeerde schepen is opgebouwd uit vijf componenten, zie figuur 5-4:

- Translatiegolven
- Impulsafname
- Wrijving

- d) Vulstraal
e) Dichtheidsverschillen



Figuur 5-4 Langskrachten op schepen in een schutkolk
Bron: lit {5.4}

Het is gebruikelijk de langskracht als promillage van het scheepsgewicht (inclusief lading) uit te drukken. In tabel 5-2 is voor verschillende scheepsklassen het troskrachtcriterium gegeven. De waarden in de tabel hebben betrekking op de som van de troskrachten.

Tabel 5-2 Troskrachtcriterium voor binnenvaartschepen

Scheepsklasse	Troskrachtcriterium (‰ van waterverplaatsing)	
	Vullen	Ledigen of vullen met drijvende bolders
CEMT klasse III	1,50	2
CEMT klasse IV	1,10	1,50
CEMT klasse Va	0,85	1,15

Bron: Ontwerp van schutsluizen deel 1

Voor klasse Vb is het troskrachtcriterium niet gedefinieerd. Wel is bekend dat in Maasbracht gebruik gemaakt wordt van drijvende bolders. Voor scheepvaartklasse Vb wordt in dit onderzoek daarom gesteld dat de langskracht op de schepen maximaal 1 ‰ van de waterverplaatsing van de schepen mag zijn, zowel tijdens vullen als tijdens ledigen van de kolk.

Aanvullende eisen met betrekking tot het vullen van de kolk:

- De bijdrage van component a (translatiegolven) aan het begin van het vulproces mag de totaal toelaatbare langskracht niet overschrijden.
- De bijdrage van component b (impulsafname) vlak voor het moment van maximaal debiet mag toelaatbare langskracht niet overschrijden.
- Voor een vloeiend verloop van het debiet moet het moment van maximale schuifopening later vallen dan het moment van maximaal vuldebiet.
- De inlaat en uitlaatopeningen moeten zodanig gepositioneerd en vormgegeven zijn, dat het stroombeeld in de kolk en voorhaven voldoende rustig is.

5.3.3 Water keren

Voor de waterkerende functie van de sluis, en dus ook voor de centrale, zijn de peilen uit paragraaf 5.2.4 van belang. Het niveau van het sluisplateau is hierop gebaseerd:

Sluisplateau bovenhoofd en verlengde kolk: NAP + 35,60 m (ontwerppeil + 2,50 m)
 Sluisplateau oude kolk en benedenhoofd: NAP + 34,60 m (ontwerppeil + 1,50 m)
 De deuren in het bovenhoofd moeten eveneens tot NAP + 35,60 m kunnen keren.

5.3.4 Water doorlaten

Door de sluis moet het spuidebiet afgevoerd kunnen worden. Het verband tussen debiet, verval en doorsnede van de openingen is in vergelijking [5.2] gegeven.

Voor het maximale debiet op het kanaal (75 m³/s) volgt dat de effectieve dwarsdoorsnede van het vulsysteem bijna 5 m² moet zijn:

$$\mu A = \frac{Q}{\sqrt{2g\Delta H}} = \frac{75}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 12,1}} = 4,9 \text{ (m}^2\text{)} \quad [5.6]$$

Voor het vullen van de kolk binnen de gestelde tijd is een grotere dwarsdoorsnede nodig, zodat deze eis niet maatgevend is. Er kan dus vanuit gegaan worden dat het afvoeren van bovenstaand debiet altijd mogelijk is.

5.3.5 Kruising droge infrastructuur

In de definitieve plannen zoals gepresenteerd in het Tracé Besluit Zandmaas/Maasroute (april 2002) blijft het benedenhoofd ongewijzigd. Over dit benedenhoofd loopt reeds een verbinding voor kruisende droge infrastructuur. Ter plaatse van het bovenhoofd hoeft dus geen rekening gehouden te worden met deze eis.

5.3.6 Energiewinning

In hoofdstuk twee is het onderzoeken van de technische haalbaarheid van de sluiscentrale als doel gesteld. Het maximaliseren van de energieopbrengst kan daarvan afgeleid worden. Hiervoor zijn de onderstaande punten van belang:

- Het vuldebiet zo lang mogelijk constant houden. Dit heeft positieve invloed op het rendement van de turbine.
- Het netto verval zo groot mogelijk houden, dus het minimaliseren van hydraulische verliezen. Dit betekent dat er geen woelkelder toegepast wordt, en zo weinig mogelijk profielveranderingen en bochten in het vulsysteem.
- Zo veel mogelijk draaiuren per jaar: hoe meer elektriciteit wordt geproduceerd, des te sneller de centrale winstgevend wordt. Om het aantal draaiuren te optimaliseren, moet het aantal schuttingen door de verlengde kolk gemaximaliseerd worden tijdens de 'schutfase'. Indien er weinig of geen scheepvaart is, wordt de verlengde kolk gesloten voor scheepvaart en uitsluitend gebruikt voor energiewinning.

5.4 Onderhoudseisen

Onderhoud aan de centrale

Voor het uitvoeren van onderhoud is het nodig om de centrale tijdelijk geheel of gedeeltelijk (bij meerdere geïnstalleerde turbines) stil te zetten. Bij het ontwerp dient dan een keuze gemaakt te worden voor de beschikbaarheid van de betreffende sluiskolk voor de scheepvaart. Als geëist wordt dat tijdens onderhoud aan de centrale de kolk beschikbaar blijft voor de scheepvaart, zal het nodig zijn om of meerdere turbines te installeren waarbij de kolk door één turbine gevuld wordt, of het bovenhoofd zodanig vorm te geven dat de kolk zowel via de turbine als via een ander riool gevuld kan worden. Als echter gesteld wordt dat tijdens onderhoud de sluis gesloten wordt voor de scheepvaart, blijft de hinder voor de scheepvaart beperkt tot de schepen die langer zijn dan 142 m. Kleinere schepen kunnen immers door de twee andere kolken gesloten worden.

Er zal hier uitgegaan worden van het eerste geval, dus dat de sluis voor scheepvaart beschikbaar blijft tijdens onderhoud aan de centrale. Indien slechts één turbine wordt geïnstalleerd, betekent dit dat de sluis ook door andere riolen gevuld moet kunnen worden tijdens onderhoud aan de turbine. Hiervoor zal dan een vorm van energievernietiging toegepast moeten worden, omdat er geen energie aan het water wordt onttrokken. Dit betekent dat het bovenhoofd van een woelkelder of een andere manier van energievernietiging voorzien moet worden. Voor dit onderzoek is dit niet interessant, omdat dan een 'traditioneel' sluishoofd ontworpen moet worden. Er wordt daarom gekozen voor het installeren van minimaal twee turbines.

Gevolg van deze oplossing is een langere schutduur tijdens onderhoud aan één van de turbines, a-symmetrische instroming en als gevolg daarvan wellicht grotere langskrachten op de afgemeerde schepen in de kolk. Deze effecten worden in dit onderzoek niet nader onderzocht.

Bereikbaarheid van de centrale tijdens onderhoud

Voor onderhoudswerkzaamheden moet de centrale goed toegankelijk zijn voor personeel. Het moet eveneens mogelijk zijn om bepaalde componenten van de centrale (zoals een turbine of generator) te vervangen. Ook voor grotere onderdelen moet de centrale dus toegankelijk zijn.

In het ontwerp dient hier rekening mee gehouden te worden.

5.5 Omgevingseisen

Het kwantificeren van omgevingseisen valt buiten de scope van dit onderzoek. Wel wordt gesteld dat hinder voor omgeving zowel tijdens de bouwfase als tijdens gebruik tot een minimum moet worden beperkt.

5.6 Uitvoeringseisen

Het kwantificeren van uitvoeringseisen valt buiten de scope van dit onderzoek. De methode van uitvoering voor de verlengde kolk zal zoveel mogelijk aangehouden moeten worden. Deze methode is zodanig dat tijdens de verlenging van de kolk de andere twee kolken voor scheepvaart beschikbaar blijven.

Zowel de verlengde kolk als het nieuwe bovenhoofd zullen pneumatisch worden afgezonken. In het ontwerp dient hiermee rekening gehouden te worden. Dit betekent dat de constructie voorzien dient te zijn van snijranden aan de onderkant, waartussen de grond onder een overdruk wordt verwijderd. De overdruk moet groter zijn dan de grondwaterdruk om het binnendringen van grondwater te voorkomen.

5.7 Literatuur

- {5.1} *Zandmaas/Maasroute Ontwerp Tracé Besluit - scheepvaart en kunstwerken*. Maastricht: Rijkswaterstaat, april 2001.
- {5.2} Eindrapport complex Maasbracht, project Zandmaas/peilopzet. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, januari 2000.
- {5.3} *Ontwerp van schutsluizen deel 1*. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, juni 2000.
- {5.4} *Handleiding LOCKFILL*. Delft: Waterloopkundig laboratorium, november 1994.

6 Functioneel en ruimtelijk ontwerp sluiscentrale

Dit hoofdstuk geeft in de eerste paragraaf een overzicht van de mogelijke manieren om een waterkrachtcentrale in een schutsluis op te nemen. In de daarop volgende paragrafen worden de doelfunctie, functionele en ruimtelijke inpassing behandeld.

6.1 Integratiemogelijkheden waterkrachtcentrale in schutsluis

Het verval over de schutsluis kan voor energiewinning op diverse manieren benut worden.

Centrale in waterspaarsysteem

Zoals al eerder vermeld zijn de oostkolk en middenkolk in Maasbracht voorzien van een waterspaarsysteem. Het water kan tussen deze kolken overgeheveld worden, zie figuur 4-4.

Het plaatsen van een turbine in het hevelsysteem is minder interessant dan het plaatsen van de centrale in het vulsysteem omdat het verval in het hevelsysteem sneller afneemt: het peil in kolk 1 daalt, terwijl het peil in kolk 2 stijgt. Daarbij moet de centrale ook geschikt zijn voor een debiet in twee richtingen.

Centrale in deuren

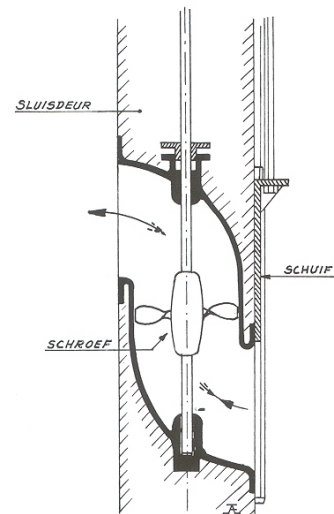
Een tweede mogelijkheid is het plaatsen van een turbine in de deuren van de sluis. In één van de sluisen in het Noordzeekanaal is een proef gedaan met een schroef in de sluisdeur (zie figuur 6-1). Het doel hiervan was niet het opwekken van energie, maar de aandrijving voor het sluiten van de deuren. De resultaten vielen echter tegen: de deuren vielen stil en moesten op andere manieren gesloten worden.

Voordelen van deze methode zijn:

- Eenvoudig
- Goedkoop
- Eenvoudig te bereiken en te vervangen
- Alleen aanpassing van deuren in het sluisontwerp

Nadelen van deze methode zijn:

- Grote gewicht van de deur + turbine
- Brede deur nodig -> grotere deurkassen nodig
- Verbinding van turbine en generator met het sluishoofd
- Aanvaarrisico



Figuur 6-1 Turbine in sluisdeur
Bron: lit. {6.1}

Het rendement van dit type centrale is afhankelijk van het toe te passen turbinetype. Als de loopschoepen van de turbine verstelbaar zijn, kan een hoog rendement gehaald worden bij een variabel debiet. Dit type biedt wellicht mogelijkheden bij sluisen met een klein verval waarbij de kolk door de deur gevuld wordt. Vanwege de beperkte ontwerp mogelijkheden zal deze methode niet verder uitgewerkt worden.

Centrale in omloopriolen

Voor sluisen met grote vervallen worden doorgaans omloopriolen in combinatie met een woelkelder toegepast voor de energievernieuwing. Dit type vulsysteem is qua afmetingen veel omvangrijker dan het vullen van de sluis door deuropeningen en biedt daarom ook meer mogelijkheden voor de integratie van een sluiscentrale. Omdat de sluisen te Maasbracht in het huidige ontwerp door riolen gevuld en geledigd worden, zal het ontwerp van de sluiscentrale betrekking hebben op het vullen van de kolk door riolen in het bovenhoofd.

Pompturbine in het gemaal

Als laatste mogelijkheid wordt hier genoemd het plaatsen van een pompturbine in het gemaal. In perioden van droogte wordt water in het kanaal gepompt. Bij voldoende debiet bovenstrooms kan de pompturbine worden omgedraaid en als waterkrachtcentrale gebruikt. Dit staat echter volledig los van het sluisontwerp en zal daarom verder niet worden uitgewerkt.

6.2 Doelfunctie

6.2.1 Doelfunctie

Als wordt besloten om tot de bouw van een centrale over te gaan, is dat omdat verwacht wordt dat de centrale op een rendabele manier elektriciteit zal kunnen leveren. Het uiteindelijke doel van de centrale is dan ook om winst te maken gedurende de economische levensduur. Aan het einde van deze levensduur is de netto contante waarde (NCW) van de centrale gelijk aan:

$$NCW = \sum_0^{T_{econ}} (R - K) - I \quad [6.1]$$

Met:

R = jaarlijkse opbrengsten, verdisconteerd naar het referentiejaar

K = jaarlijkse kosten, verdisconteerd naar het referentiejaar

I = initiële investering in het referentiejaar

T_{econ} = economische levensduur van de centrale

Het jaar waarin de bouw begint is het referentiejaar. Omdat bij grote kunstwerken de bouwtijd meer dan één jaar is, zullen in de eerste jaren na het referentiejaar doorgaans geen inkomsten gegenereerd worden. In dit geval wordt het grootste deel van de totale kosten toegeschreven aan de kolkverlenging, zodat wel gesproken kan worden over 'het' referentiejaar waarin de kosten voor de centrale gemaakt worden.

Het is dus gebruikelijk om het optimaliseren van de NCW als doel te stellen. Omdat het in dit onderzoek met name om de techniek van waterkracht gaat, zal het optimaliseren van de jaarlijkse energieproductie E als doel gesteld worden. In formulevorm wordt het optimaliseren van de jaarlijkse energieproductie als volgt:

$$\max (E) \quad [6.2]$$

In de volgende paragraaf wordt uitgebreid aandacht besteed aan de variabelen die bij het bepalen van deze functie gebruikt worden.

6.2.2 Variabelen

Hoofdvariabele

In de voorgaande subparagraaf is het maximaliseren van de jaarlijkse energieproductie E als doelfunctie geïntroduceerd. Deze energieproductie E wordt dus als hoofdvariabele gesteld. In het vorige hoofdstuk is onderscheid gemaakt tussen energiewinning tijdens schutten en tijdens spuien. In formulevorm wordt de totale energieproductie:

$$E = c_b \cdot \rho g \left(n \int_{t=0}^{t=t_{yul}} Q H \eta_t \eta_h dt + Q_{sp} H_{sp} \eta_{t,sp} \eta_{h,sp} T \right) \quad [6.3]$$

Met:

c_b	= beschikbaarheid van de centrale = 0,95	(-)	
n	= aantal schuttingen per jaar van benedenpand naar bovenpand	(-)	
Q_{sp}	= debiet in spuifase		(m ³ /s)
H_{sp}	= verval in spuifase	(m)	
$\eta_{t,sp}$	= turbinerendement tijdens spuien	(-)	
$\eta_{h,sp}$	= rendement t.g.v. hydraulische verliezen tijdens spuien	(-)	
T	= spuiduur per jaar	(s)	

De factor c_b geeft de beschikbaarheid van de centrale weer. In het Programma van Eisen is gesteld dat de sluis in 95% van de geplande openingstijden beschikbaar moet zijn. Dit betekent dat de sluis maximaal 5% van deze tijd gesloten mag zijn voor onderhoud. De berekende energieopbrengst wordt daarom vermenigvuldigd met de genoemde factor $c_b = 0,95$.

In de eerste term zijn het rendement ten gevolge van hydraulische verliezen en turbinerendement weergegeven als functie van de vultijd. Tijdens het schutten nemen verval en debiet af, zodat ook het turbinerendement en hydraulische verliezen veranderen.

Tijdens de spuifase wordt uitgegaan van een constant debiet bij een constant verval, zodat beide variabelen constant zijn.

Subvariabelen

De maximale waarde van E wordt verkregen door het optimaliseren van beide termen in vergelijking [6.3]. Om dit te bereiken zullen optimale waarden voor de volgende subvariabelen bepaald moeten worden:

- Het aantal schuttingen n : hoe vaker geschut wordt, des te hoger de energieopbrengst.
- Maximale spuiduur T : een langere spuiduur leidt tot een hogere energieproductie.
- Het vuldebiet Q . Uit vergelijking [6.3] blijkt dat een groter debiet leidt tot een grotere energieopbrengst. Niet alleen de maximale waarde is van belang, ook de omvang van het debiet als functie van de nivelleertijd is van belang. Het zo lang mogelijk constant houden van het debiet heeft namelijk niet alleen een positief effect op het turbinerendement, maar ook op de omvang van de hydraulische verliezen (is een functie van het debiet en de afmetingen van de aanvoerleiding).
- Het verval H . Vanaf het begin van het nivelleren neemt het verval af. De snelheid waarmee dit afneemt heeft grote invloed op de energieproductie. Het zal duidelijk zijn dat debiet en verval van elkaar afhankelijk zijn.
- Het turbinerendement η_t . Dit rendement is een functie van turbinetype, debiet en verval.
- Het rendement ten gevolge van de hydraulische verliezen η_h . Het verlies in valhoogte bij de turbine is afhankelijk van de doorsnede en vormgeving van de aanvoerleiding en afvoerleiding (zuigbuis) en het gebruik van een vuilrek of een rek ter bescherming van vissen.

Basisvariabelen

De subvariabelen zijn afhankelijk van onderstaande basisvariabelen:

- *Dwarsdoorsnede en vormgeving aanvoer- en afvoerleiding*
De dwarsdoorsnede van de aanvoerleiding is niet alleen bepalend voor het vuldebiet maar ook voor een deel van de hydraulische verliezen.
De hydraulische verliezen worden mede door de vormgeving van de aanvoerleiding bepaald. Een gestroomlijnde instroomopening en het beperken van bochten, vernauwingen en profielveranderingen zal leiden tot beperking van deze verliezen.
- *Turbinetype*
Het turbinerendement is afhankelijk van het turbinetype en de omvang van het werkelijk doorgevoerde debiet in verhouding tot het ontwerpdebiet.
- *Aantal turbines*
Het installeren van één grote of meerdere kleine turbines heeft uiteraard grote invloed op het ontwerp van het sluishoofd wat betreft afmetingen en hoogteligging van de turbine.
- *Hefprogramma van de rioolschuiven*
Het verloop van het debiet door de aanvoerleiding wordt beïnvloed door het hefprogramma. Door de doorstroomopening langzaam te vergroten, even constant te houden en vervolgens weer verder te vergroten wordt het debiet door de turbine gereguleerd, wat het rendement van de turbine positief beïnvloedt.
- *Hoogte van de turbineas ten opzichte van het benedenwater*
Diepteligging van de turbineas ten opzichte van benedenwater heeft invloed op het rendement van de turbine en op mogelijke cavitatievorming

Het ontwerp is van twee kanten te benaderen: enerzijds dient een turbine gekozen te worden met bepaalde eigenschappen (toerental, waaierdiameter, hoogteligging), anderzijds dient het vulprogramma zodanig vormgegeven te worden dat de turbine met een zo hoog mogelijk rendement kan draaien.

Bij het ontwerp zal gebruik gemaakt worden van het programma LOCKFILL voor het bepalen van de grootte van het debiet en langskrachten op de schepen in de kolk.

6.3 Functionele inpassing

Onder functionele inpassing wordt verstaan: het opnemen van een waterkrachtcentrale in het sluisbedrijf, zodanig dat de energieopbrengst gemaximaliseerd wordt, terwijl de scheepvaart zo weinig mogelijk hinder hiervan ondervindt. Er worden twee fasen onderscheiden:

- 1) Normale tot hoge scheepvaartintensiteit, drie sluizen in bedrijf. Het gebruik van de verlengde kolk met centrale verdient de voorkeur voor het schutten van schepen ten einde de energieproductie te maximaliseren. De gelijkmatige verdeling van schepen over de drie koken die eerder is aangehouden bij het bepalen van een voorlopige schatting van de energieproductie is dan niet meer geldig.

2) Weinig tot geen scheepvaart. In hoofdstuk 5 is aangegeven gedurende welke uren van de week de sluisen voor de scheepvaart beschikbaar moeten zijn. Als de verlengde kolk op zondag gesloten blijft voor de scheepvaart kan gedurende 34 uur per week continu energie geproduceerd worden. De scheepvaart kan op die momenten door de twee andere kolken geschut worden, met uitzondering van de schepen die langer zijn dan 142 m (CEMT-klasse Vb). Het is doordeweeks niet mogelijk om door de kolk te spuien, omdat de sluisen 24 uur per dag beschikbaar moeten zijn voor de scheepvaart.

Voor deze fase van energiewinning is een lage scheepvaartintensiteit een belangrijke voorwaarde, omdat gesteld is dat energiewinning ondergeschikt is aan de scheepvaartfunctie van de sluis.

Voor beide fasen is de aanvoer van water van groot belang. In de droge zomermaanden zal het hevelsysteem tussen de kolken zoveel mogelijk gebruikt worden (zie hoofdstuk 4). In paragraaf 6.3.1 worden de voorwaarden met betrekking tot de beschikbare hoeveelheid water gegeven. De genoemde fasen worden in het vervolg aangeduid met energiewinning tijdens schutten respectievelijk spuien.

6.3.1 Beschikbare hoeveelheid water

Het beperken van schutverliezen wordt als zeer belangrijk beschouwd, wat ook is op te maken uit de aanwezigheid van het gemaal en het hevelsysteem tussen de oostkolk en middenkolk.

Voor de beschikbare hoeveelheid water wordt gebruik gemaakt van de afvoerduurlijn, welke in bijlage C5 is weergegeven. In figuur 6-2 is een deel van de totale afvoerduurlijn te zien.

Bij benadering neemt het debiet per week met ongeveer 5 m³/s toe.

Het beschikbaar debiet voor de centrale is afhankelijk van drie voorwaarden; het minimum debiet dat door de Grensmaas gevoerd moet worden, het maximaal toelaatbaar debiet op het kanaal en het debiet dat gereserveerd wordt voor het compenseren van schutverliezen.

Debiet Grensmaas

Het minimaal vereiste debiet dat door de Grensmaas gevoerd moet worden is 10 m³/s. Dit is voldoende voor recreatie en het voorkomen van droogvallen van de rivier.

Maximaal kanaaldebiet

In het Programma van Eisen is gesteld dat er maximaal 75 m³/s op het kanaal gelaten mag worden, in verband met maximaal toelaatbare stroomsnelheden voor de scheepvaart.

Compensatie schutverlies

Het waterverlies uit het kanaal als gevolg van het schutten wordt deels gecompenseerd door het gebruik van het hevelsysteem, deels door het gemaal dat water uit de Maas in het kanaal pompt. Het is echter ook mogelijk om een debiet op het kanaal te laten ter compensatie van de schutverliezen. In dat geval hoeft het gemaal niet of minder vaak gebruikt te worden, wat tot een aanzienlijke energiebesparing leidt. De berekening van het compensatiedebiet is als volgt:

Aantal schepen per jaar (beide richtingen, 2001) :	32.524
Aantal schepen per dag:	90
Aantal schuttingen per dag (2 schepen per schutting):	45
Aantal schuttingen per dag per kolk (3 kolken):	18 ¹
Aantal cycli per dag per kolk:	9
Schutschijf van de verlengde kolk: 16*210*12,1 =	40.656 m ³
Schutschijf van de kleine kolken: 16*142*12,1 =	27.491 m ³
Waterverlies per dag kleine kolken: 2*9*27.491 =	494.838 m ³
Waterverlies per dag verlengde kolk: 1*9*40.656 =	365.904 m ³
Totaal waterverlies per dag ² :	860.742 m ³
Totaal waterverlies per seconde:	10 m ³

Er zal uitgegaan worden van een compensatiedebiet van 10 m³/s, zodat het schutverlies volledig door het debiet op het kanaal gecompenseerd wordt. De drie weken per jaar dat dit door watergebrek niet mogelijk is, moeten het hevelsysteem en gemaal gebruikt worden. Een bijkomend voordeel van het compenseren van het schutverlies door een debiet op het kanaal te laten, is het feit dat de tweelingsluizen onafhankelijk van elkaar gebruikt kunnen worden. Er hoeft niet geheveld te worden, en dus hoeft er ook niet gelijktijdig geschut te worden.

In figuur 6-2 zijn het compensatiedebiet, het gereserveerde debiet voor de Grensmaas, het maximumdebiet op het kanaal en het resterende turbineerbaar debiet weergegeven.

6.3.2 Schutfase

Voor de energieopbrengst uit het schutten van schepen is het belangrijk om een goede inschatting te maken van het aantal schepen dat door de verlengde kolk geschut zal worden. In het locatieonderzoek is op basis van tabel 6-1 een inschatting gemaakt van het aantal schuttingen per jaar door de verlengde kolk: 15.178 schepen, gemiddeld 2 schepen per kolk, 3 kolken in gebruik. Dit levert 2530 schuttingen op.

¹ voor de scheepvaart wordt, met uitzondering van de droge perioden, ook leeg geschut: 20 tot 25 procent van het totaal, dus 20% van 15 schuttingen = 3, totaal 18 schuttingen

² Bij de berekening van het waterverlies is uitgegaan van het verlies van de gehele schutschijf per cyclus. Er is dus geen rekening gehouden met het waterspaarsysteem tussen de middenkolk en oostkolk. De fout die hiermee gemaakt wordt, blijft beperkt tot 3 weken per jaar; dat is het aantal weken dat het beschikbaar debiet kleiner is dan 20 m³/s (waarvan 10 m³/s door de Grensmaas gevoerd moet worden).

Tabel 6-1 Opschuttende scheepvaart Maasbracht (2001)

Type	Laadvermogen (tonnen)	Aantal schepen
vrachtvervoerend	21-250	43
vrachtvervoerend	250-400	1196
vrachtvervoerend	400-650	2607
vrachtvervoerend	650-1000	2476
vrachtvervoerend	1000-1500	3437
vrachtvervoerend	1500-2000	1182
vrachtvervoerend	2000-3000	925
vrachtvervoerend	>3000	97
vrachtvervoerend	onbekend	+
Totaal vrachtvervoerend	-	11978
Niet vrachtvervoerend	-	355
Recreatie	-	2845
TOTAAL	-	15178

Bron: CBS

In werkelijkheid zal het aantal schuttingsen niet gelijk zijn aan bovenstaande benadering. De verdeling van de scheepvaart over de kolken is namelijk afhankelijk van een aantal factoren:

- Kolkoppervlak van de diverse kolken
- Scheiding van scheepvaart (beroepsvaart vs. recreatievaart)
- Spreiding van aankomst scheepvaart
- Voorkeurskolk
- Openingszijde van de kolk

Kolkoppervlak

De scheepvaart zal altijd de kleinste mogelijke kolk willen gebruiken, omdat die kolk het snelst genivelleerd wordt. Ook in verband met het waterbeheer zal de kleinste kolk de voorkeur krijgen in verband met het schutverlies uit het kanaal. De verlengde kolk zal op basis van deze criteria niet de voorkeur krijgen.

Spreiding van scheepvaarttype

De sluisbeheerder zal uit oogpunt van veiligheid en overzicht kiezen voor het spreiden van scheepstypen. Recreatievaart zal door een andere kolk geschut worden dan beroepsvaart. De recreatievaart zal dan door de kleinste beschikbare kolk geschut worden.

Spreiding van aankomst scheepvaart

Het scheepsaanbod is afhankelijk van het tijdstip van de dag en de periode van het jaar. Afhankelijk van de afmetingen van de kolk zullen er de ene keer meer schepen tegelijk geschut worden dan de andere keer.

Voorkeurskolk

De scheepvaart zal een voorkeur hebben voor de kolk waar het makkelijkst ingevaren en uitgevaren kan worden. Dit is de kolk die het dichtst bij de as van de vaarweg ligt. Hierbij krijgt beroepsvaart voorrang op de recreatievaart, omdat laatstgenoemde wendbaarder is en dus eerder naar de westkolk (ligt het verst uit de as van het kanaal) gedirigeerd zal worden.

Openingszijde van de kolk

De toewijzing van kolken aan de scheepvaart is mede afhankelijk van de 'stand' van de kolk: kan de kolk op het betreffende moment vanaf het bovenpand of vanaf het benedenpand worden ingevaren. De scheepvaart zal altijd die kolk kiezen die het eerst ingevaren kan worden. De kolk zal niet leeg genivelleerd worden om een schip vanaf de andere zijde door die betreffende kolk te schutten.

Bovenstaande factoren zijn alle bepalend voor de verdeling van de scheepvaart over de kolken in een complex. Met verkeerswaterbouwkundige software (SIVAK, Simulatie van VerkeersAfwikkeling bij Kunstwerken) kan die verdeling worden berekend. In dit model bestaat echter niet de mogelijkheid om de grootste kolk als voorkeurskolk aan te wijzen. Tussen de doelfunctie (maximaliseren van aantal schuttingsen door verlengde kolk) en het programma bestaan de volgende conflicten die het gebruik van dit model in dit onderzoek onbruikbaar maken:

- Scheepvaart wil kleinste kolk benutten, voor energieproductie dient verlengde kolk het meest gebruikt te worden.
- Scheepvaart wil zo min mogelijk wachttijd: gebruiken van de eerst beschikbare kolk.

Voor energiewinning is het beter om zo nodig een kolk eerst leeg te nivelleren om daarna de centrale in gebruik te stellen.

- Spreiding van scheepstypen: voor energiewinning zoveel mogelijk schepen door de verlengde kolk, voor scheepvaart: spreiding van scheepstypen voor overzicht en veiligheid.

Het is dus niet mogelijk om SIVAK hiervoor te gebruiken. Ondanks de hinder die de verlengde kolk voor de scheepvaart oplevert, zal de kolk toch als voorkeurskolk worden aangemerkt. Dit betekent dat het aantal schuttingen door deze kolk hoger zal zijn dan het gemiddelde dat in de voorstudie is aangenomen. Er wordt aangenomen dat er jaarlijks 3000 keer geschut wordt door de verlengde kolk. Dit is 18% meer dan in de voorstudie als gemiddelde is aangenomen.

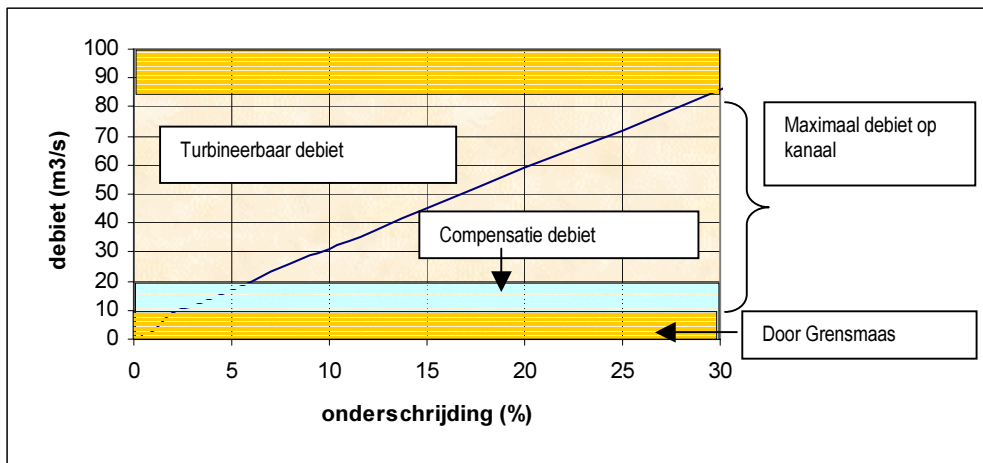
6.3.3 Spuifase

De mogelijkheid om te spuien door de sluis is afhankelijk gesteld van de scheepvaartintensiteit en de aanvoer van water.

Met betrekking tot de scheepvaart is in hoofdstuk 5 gesteld dat als de verlengde kolk op zondag gesloten blijft voor de scheepvaart, er per week gedurende 34 uur gespuid kan worden. Dit levert in principe $52 \times 34 = 1768$ uur per jaar op.

In de zomermaanden wordt het gemaal ten oosten van de sluis gebruikt om water van de Maas in het Julianakanaal te pompen om het schutverlies te compenseren. Het is dus niet reëel om te veronderstellen dat in deze maanden gespuid kan worden. De beschikbare hoeveelheid water voor energiewinning wordt bepaald door de afvoerduurlijn (figuur 6-2), het minimale debiet dat door de Grensmaas gevoerd moet worden, het maximaal op het kanaal toelaatbare debiet (i.v.m. de scheepvaart) en het benodigde debiet op het kanaal om schutverliezen te compenseren.

Op basis van deze voorwaarden kan in figuur 6-2 het voor de centrale beschikbare debiet worden afgelezen. Deze waarden staan ook in tabel 6-2 vermeld.



Figuur 6-2 Beschikbaar turbineerbaar debiet

Tabel 6-2 Turbineerbaar debiet

Turbineerbaar debiet (m³/s)	Onderschrijding (%)	Onderschrijding (weken)	Beschikbaar (weken per jaar)
5	7,8	4	1
10	9,5	5	1
15	11,5	6	1
20	13,2	7	1
25	15	8	1
30	16,8	9	1
35	18,5	10	1
40	20,4	11	1
45	22,3	12	1
50	24,2	13	1
55	26	14	1
60	28	15	1
65	29,8	16	36

In de laatste kolom staat welk debiet gedurende hoeveel weken door de sluis gespuid kan worden. Hierbij is nog geen rekening gehouden met het minimale debiet dat door de turbine gevoerd moet worden.

6.4 Ruimtelijke inpassing

6.4.1 Keuze voor de te verlengen kolk

In de huidige plannen is gekozen voor het verlengen van de oostelijke kolk van het sluisencomplex. Deze keuze is gebaseerd op tabel 6-3.

Tabel 6-3 Vergelijking sluiscolken Maasbracht voor kolkverlenging

Aspect	Westkolk	Middenkolk	Oostkolk
Aanvaarroute	0	++	++
Positie en lengte remmingwerk	+	-	+
Interactie met overig verkeer	+	0	0
Capaciteit	+	+	+
Ingrepen in de omgeving	--	0	-
Ruimtebeslag	--	0	0
Kosten	--	0	0
Waterverlies	+	--	--
Hinder tijdens bouw voor omwonenden	--	+	+
Hinder tijdens bouw voor scheepvaart	-	--	-
Totaal	-5	-1	+1

Bron: Ontwerp Tracé Besluit Zandmaas/Maasroute

Het verlengen van de oostkolk hoeft voor de waterkrachtcentrale niet de beste optie te zijn. De drie kolken worden nu voor de inpassing van de waterkrachtcentrale ook vergeleken op de volgende selectiecriteria:

- Aanwezigheid van een voorkeursluis: het kan zijn dat één bepaalde sluis de voorkeur heeft van schippers vanwege het eenvoudig in- en uitvaren. De energieproductie zal het grootst zijn als de centrale in die kolk wordt ingepast.
- Beschikbare ruimte: de sluisen worden vergeleken op de beschikbare ruimte voor het inpassen van een turbine in het vulsysteem.
- Onder hinder voor scheepvaart wordt verstaan: het ontstaan van dwarsstroming in voorhavens, langere wachttijden, stroming in de kolk tijdens vullen/ledigen. Dit geldt zowel voor schepen die van de verlengde kolk gebruik maken, als voor schepen die in de naastgelegen kolken geschut worden.
- Waterverlies: in hoofdstuk 3 is het belang van waterbesparing in droge perioden aan de orde gekomen. De kolken worden vergeleken op de omvang van het waterverlies indien bij de betreffende kolk energie gewonnen wordt.
- Kosten
- Ingrep in de omgeving

In tabel 6-4 zijn de drie kolken op bovenstaande criteria vergeleken.

Tabel 6-4 Vergelijking sluiscolken Maasbracht voor inpassing waterkrachtcentrale

Aspect	Westkolk	Middenkolk	Oostkolk
Voorkeurskolk	-	+	+
Beschikbare ruimte	+	0	+
Hinder voor scheepvaart	0	-	-
Waterverlies	++	-	-
Kosten	0	0	0
Ingreep in omgeving	-	+	-
Totaal	+1	0	-1

Toelichting op tabel 6-4

- Voorkeurskolk: voor de scheepvaart is het in- en uitvaren naar de middenkolk en oostkolk beter dan naar de westkolk. Dit komt omdat de twee eerstgenoemde kolken dicht bij de as van het Julianakanaal liggen.
- Beschikbare ruimte: de beschikbare ruimte bij de westkolk is beter dan bij de oostkolk. Dit heeft twee redenen: het middeneiland tussen de westkolk en middenkolk is breder en ten oosten van de oostkolk ligt een gemaal. Het middeneiland tussen de middenkolk en oostkolk biedt weinig mogelijkheden voor het plaatsen van een turbine. Ten westen van de westkolk is voldoende ruimte beschikbaar.
- Hinder voor scheepvaart: met betrekking tot dit aspect verdient de westkolk de voorkeur boven de andere twee kolken. Dit heeft vooral betrekking op de spuifase. De westkolk is door remming- en geleidewerken afgescheiden van de tweelingsluizen die dan voor de scheepvaart gebruikt worden.
- Een belangrijk punt is het waterverlies: omdat de oostkolk en middenkolk door een wateruitwisselingssysteem met elkaar zijn verbonden, is het verstandig om de westkolk aan te passen. Het waterspaarsysteem kan dan onveranderd blijven werken. Dit is een zeer belangrijke voorwaarde in de droge zomermaanden.
- De kosten worden gelijk verondersteld voor de aanpassing van elke sluis.
- Ingreep in de omgeving: bij het aanpassen van de middenkolk vinden er geen ingrepen plaats in de directe omgeving, maar uitsluitend op het sluiscomplex zelf. De west- en oostkolk worden negatief beoordeeld op dit punt, omdat in dat geval wel ingrepen buiten het sluiscomplex vereist zijn.

Voor de sluiscentrale blijkt het verlengen van de westkolk de beste optie te zijn. Dit heeft met name te maken met het hevelsysteem in de oost- en middenkolk.

Uit tabel 6-3 blijkt het aanpassen van de westkolk de slechtste optie te zijn, vooral door de hoge kosten die met het verplaatsen van de westelijke kanaaldijk zijn gemoeid. De nautische eisen hebben bij de keuze voor de oostkolk een zeer grote rol gespeeld. Omdat als uitgangspunt gesteld is dat de scheepvaart de hoogste prioriteit krijgt, is het niet aannemelijk om te kiezen voor het verlengen van de westkolk op basis van de resultaten uit tabel 5-3. Er zal dan ook uitgegaan worden van verlenging van de oostkolk, conform de huidige plannen van Rijkswaterstaat.

6.4.2 Configuratie centrale

Traditionele rivierwaterkrachtcentrales bestaan uit drie hoofdcomponenten: de centrale, de stuw en sluizen voor de scheepvaart. Deze componenten zijn op een aantal manieren naast elkaar te positioneren, wat leidt tot vier hoofdalternatieven voor de configuratie van de centrale:

- Conventionele type (block powerplant). De turbines zijn naast elkaar geplaatst in één centraal gebouw. De stuw en schutsluizen bevinden zich daarnaast.
- Gesplitste centrale (twin power plant). Aan weerszijden van de stuw zijn centrales gebouwd. Dit type komt voor bij grensrivieren waaraan beide landen energie willen onttrekken. Ook indien men ijsafvoer in het midden van de rivier wil concentreren is dit een goede optie.
- Pijlercentrale. De turbines zijn in de pijlers tussen de stuwelementen geplaatst.
- Overstroombare centrale. Bij dit type worden stuwmiddel, overlaat en centrale in één constructie geïntegreerd.

Bij schutsluizen is er geen apart stuwmiddel; de puntdeuren kunnen gezien worden als de wateropstuwende elementen, de sluishoofden als de pijlers van de stuw. Op basis van bovenstaande configuraties voor riviercentrales kunnen dan de volgende alternatieven voor de sluiscentrale opgesteld worden:

- Centrale naast de sluis. De centrale wordt aan één zijde van de kolk gebouwd. In het geval van de oostkolk te Maasbracht betekent dit dat de centrale tussen kolk en gemaal wordt gebouwd.
- Gesplitste centrale: aan weerszijden van de oostkolk wordt in het bovenhoofd een centrale gebouwd met daartussen het stuwmiddel (deuren in het bovenhoofd).
- Overstroombare centrale. In tegenstelling tot gewone riviercentrales zal niet alleen water over de centrale stromen, maar zal ook de scheepvaart boven de centrale de kolk in en uit varen.

In bijlage E zijn deze alternatieven voor de verlengde oostkolk weergegeven.
De keuze voor een bepaalde configuratie wordt gemaakt op basis van de criteria in tabel 6-5.

Tabel 6-5 Beoordeling centrale configuraties

	<i>Overstroombare centrale</i>	<i>Blokcentrale</i>	<i>Gesplitste centrale</i>
Hinder voor scheepvaart			
Bouwfase	-	+	--
Gebruiksfase	-	+	0
Hinder voor omgeving			
Bouwfase	0	0	0
Gebruiksfase	++	-	0
Hydraulisch rendement	+	-	-
Grondverzet	0	-	+
Bereikbaarheid voor onderhoud	0	+	0
Ruimtebeslag	+	-	0
Kosten	+	0	--
TOTAAL	+3	-1	-4

De gesplitste centrale blijkt de slechtste optie te zijn. Ten eerste omdat de ruimte tussen oostkolk en middenkolk erg beperkt is, ten tweede omdat de centrale opgedeeld is, en alle componenten dubbel uitgevoerd dienen te worden. Er zal op basis van een afweging tussen voordelen en nadelen (zie tabel 6-6) gekozen worden voor de overstroombare centrale.

Tabel 6-6 Voordelen en nadelen configuraties voor sluiscentrale

Configuratie	Voordelen	Nadelen
Blokcentrale naast sluis	Één centrale is goedkoper dan splitsing Grote waterdiepte beschikbaar op drempel voor invaren scheepvaart Goed toegankelijk voor onderhoud Hergebruik bestaande deuren en bewegingswerken Voldoende ruimte voor turbinehal en generatorruimte	Goed zichtbaar in landschap Hydraulische verliezen groter dan bij overstroombare centrale door extra bocht Asymmetrische instroming in kolk Groot ruimtebeslag naast kolk
Gesplitste centrale	Minder ruimtebeslag aan de kant van gemaal Grote waterdiepte op drempel bovenhoofd voor scheepvaart Hergebruik deuren en bewegingswerken mogelijk	Duurder dan blokcentrale Hydraulische verliezen groter dan bij overstroombare centrale Weinig ruimte beschikbaar op middeneiland
Overstroombare centrale	Geen ruimtebeslag naast kolk Niet zichtbaar in landschap Één centrale gebouw Kleine constructie is goedkoop	Hergebruik deuren slechts mogelijk na verkorting Beperkte ruimte voor turbine en generator Minder goed toegankelijk voor onderhoud Ligt onder scheepvaartroute: kans op aanvaring

6.5 Literatuur

- {6.1} Arends, G.J., *Sluizen en gemalen in het Noordzeekanaal: anderhalve eeuw ontwerpen, bouwen en vernieuwen*. Utrecht: Uitgeverij Matrijs, 2001.
- {6.2} Mosonyi, E., *Water Power Development, volume one: low-head power plants*. Budapest: Akadémiai Kiadó, publishing house of the Hungarian Academy of Sciences, 1963.
- {6.3} Zandmaas/Maasroute Ontwerp Tracé Besluit - scheepvaart en kunstwerken. Maastricht: Rijkswaterstaat, april 2001.

7 Turbineontwerp

Het doel van dit hoofdstuk is het selecteren van het meest geschikte turbineontwerp voor de sluiscentrale. In de eerste paragrafen zullen een aantal ontwerpvariabelen van het turbineontwerp aan de orde komen. Tegelijkertijd zal, waar mogelijk, een keuze gemaakt worden voor de waarde van die variabelen. In de laatste paragraaf wordt een voorlopige keuze gemaakt voor het turbineontwerp.

7.1 Inleiding

Hoewel het ontwerpen van een turbine in hoofdzaak een werktuigbouwkundige zaak is, zal in dit onderzoek toch de nodige aandacht besteed moeten worden aan dit onderwerp. De reden ligt in het feit dat het ontwerp van de turbine invloed heeft op het civiele ontwerp van het sluishoofd, alsmede de energieproductie van de centrale. De aspecten van het turbineontwerp die hierop betrekking hebben en uitgewerkt zullen worden, zijn:

- Turbinetype
- Aantal te installeren turbines
- Ontwerpverval
- Ontwerpdebiet
- Waaierdiameter
- Hoogteligging van de turbineas i.v.m. cavitatie
- Turbinerendement als functie van het debiet
- Overbrenging

7.2 Turbinetype

Het selecteren van een turbinetype is afhankelijk van een aantal variabelen. In de literatuurstudie in bijlage A is aangegeven dat een turbine in eerste instantie op basis van verval en debiet wordt geselecteerd. Het mag duidelijk zijn dat voor het turbineontwerp van de sluiscentrale dit de kern van het probleem is, omdat er geen sprake is van een constant verval en debiet tijdens het nivelleren van de kolk.

Daarnaast zijn nog twee criteria van belang; het rendement bij lager respectievelijk hoger doorvoerdebiet en de kosten van de turbine.

Door het afnemen van verval en debiet tijdens het vullen van de kolk is het van belang om te kijken naar het rendement van de turbine buiten het ontwerppunt. De turbine wordt namelijk op één bepaald verval en debiet gedimensioneerd. In dit ontwerppunt is het rendement maximaal. Zodra het doorgevoerde debiet afneemt (of toeneemt), zal het rendement van de turbine dalen. Dit is de 'partflow efficiency', welke zo hoog mogelijk gehouden dient te worden.

De kostprijs van de turbine is uiteraard een belangrijk criterium, aangezien dit aspect van directe invloed is op de haalbaarheid van de sluiscentrale. Zoals al eerder gesteld is, wordt met name gekeken naar de technische haalbaarheid van de centrale. Het kiezen van een turbine zal daarom op basis van optimalisatie van de energieproductie plaatsvinden, en worden kosten slechts in kwalitatieve zin meegenomen in de afweging.

Voor de sluiscentrale in Maasbracht komen op basis van de genoemde selectiecriteria de volgende turbinetypen in aanmerking:

- Crossflow (Banki-Mitchell)
- Verticaal opgestelde Kaplan
- Bulb
- Axiale buisturbine

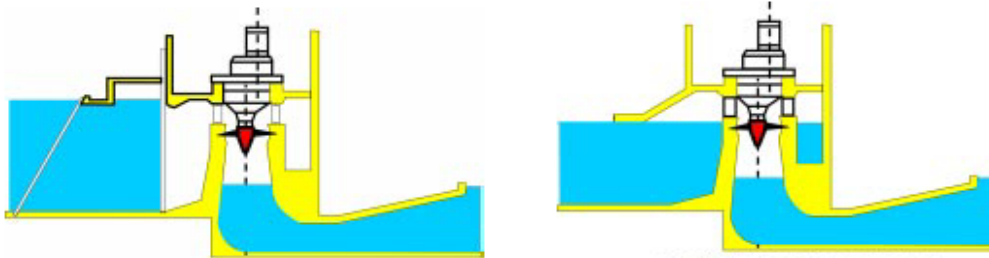
7.2.1 Crossflow turbine

De Crossflow behoort tot de impulsturbines, wat betekent dat de waaier bij atmosferische druk draait. De waaier moet dus altijd boven de benedenwaterstand geplaatst worden, dus boven de hoogste kolkwaterstand. Dit is gelijk aan de waterstand bovenstrooms, zodat dit turbinetype voor de sluiscentrale niet toepasbaar is.

7.2.2 Kaplan turbine

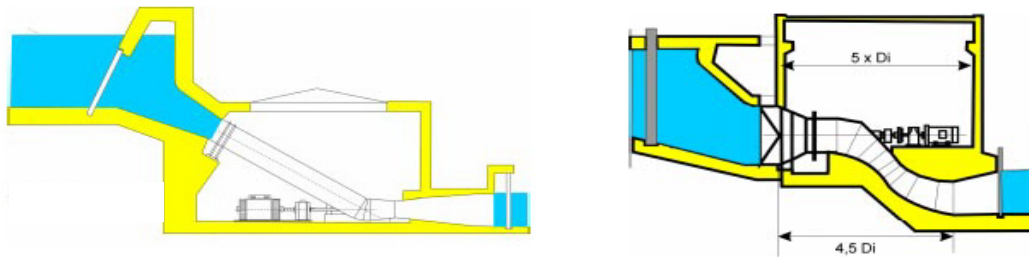
De verticaal opgestelde Kaplan turbine is van het reactietype, wat betekent dat de waaier in een geheel met water gevulde ruimte draait. Wanneer zowel leidschoepen als loopschoepen verstelbaar zijn, spreekt men over een dubbel gereguleerde Kaplan. Een belangrijk kenmerk van deze dubbel gereguleerde turbine is het hoge rendement wanneer verval en debiet buiten het ontwerppunt liggen, zie figuur 7-8. Dit maakt de verticale Kaplan tot een geschikt turbinetype voor de sluiscentrale.

Figuur 7-1 Kaplan in gewone opstelling (links) en sifon opstelling (rechts)



7.2.3 Axiale buisturbine

De axiale buisturbine is in principe hetzelfde als de Kaplan turbine, zowel leidschoepen als loopschoepen zijn verstelbaar (of kunnen verstelbaar zijn). Ook van dit type is het rendement bij het ontwerppunt hoog, zie figuur 7-9.



Figuur 7-2 Axiale buisturbine (S-configuratie)

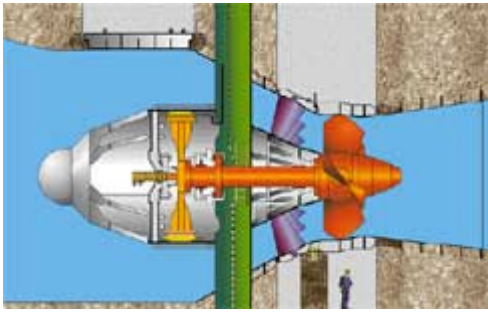
Van de axiale buisturbine zijn diverse configuraties mogelijk, twee daarvan zijn weergegeven in figuur 7-2. Op voorhand is nog niet te zeggen welke configuratie voldoet en welke niet. Er zal hier dus ook nog geen keuze gemaakt worden voor een bepaald type.

7.2.4 Bulb turbine

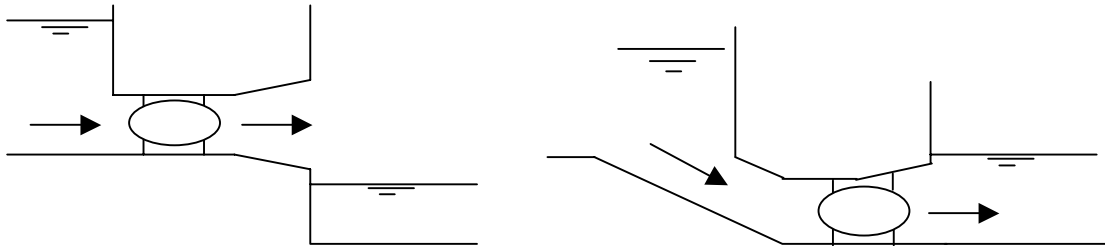
De Bulb turbine is eveneens een aanpassing van de verticale Kaplan. De turbineas is horizontaal, zowel leidschoepen als loopschoepen zijn verstelbaar. Bij de Bulb is de generator ondergebracht in een omhuizing die in de waterstroom is geplaatst.

De berekening van waaierdiameter en toerental van Bulb en axiale buisturbine wordt volgens dezelfde vergelijkingen gemaakt.

Voor de sluiscentrale is de Bulb turbine door de vereiste horizontale ligging van de turbineas alleen toepasbaar indien de kolkwaterstand voldoende hoog is, of als de turbineas voldoende laag geplaatst kan worden. Het eerste geval komt niet voor (alleen als de kolk al gedeeltelijk is genivelleerd, zie figuur 7-4 links), het tweede geval is door het grote verschil in bodemniveau en kolkvloer (ruim 7 m) alleen mogelijk door de bodem van het kanaal te laten aflopen tot het kolkvloer niveau, zie figuur 7-4 rechts. Dit vereist een grote ontgraving van het bovenpand en voldoet niet aan de eis dat de afmetingen van de centrale niet groter mogen zijn dan van het bestaande bovenhoofd met woelkelder. De Bulbturbine is derhalve niet toepasbaar voor de sluiscentrale en zal niet in de alternatievenstudie worden meegenomen.



Figuur 7-3 Bulb turbine



Figuur 7-4 Plaatsing turbineas in sluiscentrale

7.3 Aantal turbines

Als de aangevoerde hoeveelheid water grote variaties vertoont zal bij een 'normale' waterkrachtcentrale gekozen worden voor het installeren van meerdere kleine turbines. Bij een klein debiet worden dan 1 of 2 turbines gebruikt. Als het debiet groter wordt, zullen meerdere turbines opgestart worden. In dit geval is de keuze voor het aantal te installeren turbines afhankelijk van het debiet bovenstrooms.

Bij de sluiscentrale gaat bovenstaande methodiek niet op, omdat het debiet niet afhankelijk is van de situatie bovenstrooms van de centrale maar van het verval in de kolk. De keuze voor het installeren van één of meer turbines is afhankelijk van een aantal factoren, te weten:

- inpassingsmogelijkheden en beschikbare ruimte in het sluishoofd
- toelaatbare hoogteligging (zie paragraaf 7.7)
- afmetingen en kosten van de turbine
- vereiste continuïteit van bedrijf van de centrale tijdens onderhoud

7.4 Ontwerpverval

Het uitgangspunt voor het turbineontwerp is het ontwerpverval. Dit is het verval dat op de locatie het meest voorkomt. Bij de sluiscentrale is hier echter geen sprake van, zodat het ontwerpverval op een andere manier gekozen moet worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met onderstaande punten:

- Minimumverval. Standaardturbines hebben meestal een minimaal benodigd verval van 2 meter. Als het verval lager wordt kan geen energie meer opgewekt worden. De schoepen van de turbine(s) worden dan geleidelijk geopend zodat nog wel water doorgevoerd kan worden.
- Partflow efficiency. In het ontwerp punt is het rendement van de turbine maximaal, daarbuiten neemt dat rendement af. Het ontwerp punt moet zodanig gekozen worden dat ook buiten dat punt (zowel wat betreft verval als debiet) het rendement zo hoog mogelijk blijft.

Het maximaal verval in Maasbracht is 12 m, het minimaal verval is 2 m. Het effectief te gebruiken verval is dus maximaal 10 m. Wanneer het gemiddelde verval als ontwerp punt gekozen wordt, ligt het ontwerpverval op $10/2 + 2 = 7$ m. Bij deze waarde kan de turbine zowel functioneren bij een groter als bij een kleiner verval.

7.5 Ontwerpdebiet

Het gemiddeld debiet om de kolk in de gestelde tijd te vullen, wordt als volgt berekend:

$$Q_{gem} = \frac{\text{schuttschijf}}{\text{vultijd}} = \frac{210 \cdot 16 \cdot 12 \text{ m}^3}{15 \text{ min}} = 44,8 \text{ m}^3 / \text{s} \quad [7.1]$$

Omdat dit een gemiddelde is, zal het ontwerpdebiet hoger moeten zijn. Eerder is gesteld dat maximaal 65 m³/s door de turbine gevoerd kan worden in de spuifase. Het ligt dan ook voor de hand om het ontwerpdebiet gelijk te stellen aan dit debiet, omdat de centrale dan met maximaal rendement draait. Er zal voor de centrale dan ook uitgegaan worden van een ontwerpdebiet van 65 m³/s.

7.6 Waaierdiameter

7.6.1 Kaplan turbines

Omdat al eerder gesteld is dat het ontwerp van de turbine niet het werkterrein van de civiel ingenieur is, zal voor het bepalen van de afmetingen van de turbine worden volstaan met globale dimensionering van de turbine. Voor de Kaplan turbine kan de diameter van de waaier afhankelijk gesteld worden van het ontwerpdebiet en ontwerpverval (waarbij de contractiecoëfficiënt gelijk is gesteld aan 0,63):

$$D = \sqrt{\frac{Q}{2,2\sqrt{H}}} \quad (\text{m}) \quad [7.2]$$

Uit deze vergelijking blijkt dat het kiezen van een groter ontwerpverval leidt tot een kleinere waaierdiameter. Voor het beperken van de kosten is het dus gunstig om het ontwerpverval te kiezen met een klein debiet en een groot verval. In bijlage F1 is voor verschillende combinaties van Q en H de benodigde waaierdiameter gegeven.

7.6.2 Axiale buisturbines

Voor de axiale buisturbine is de berekening van de diameter van de waaier volgens Schweiger en Gregory (lit 7.2) afhankelijk van de classificatie van de centrale; groot ($P > 2 \text{ MW}$) of klein ($P < 2 \text{ MW}$), dus ook als functie van debiet en verval ($P=8*Q*H$).

De resultaten van deze berekeningen zijn voor verschillende combinaties van Q en H eveneens in bijlage F2 te vinden.

Uit de figuren in de bijlage blijkt dat de diameter van de Kaplan turbine bij gelijke waarden voor het ontwerpdebiet en ontwerpverval iets groter is dan van de axiale buisturbine, vooral bij de lagere vervallen.

De diameter van de waaier is een bepalende variabele in het ontwerp van de sluiscentrale. Een kleinere diameter is voor zowel de inpassing als de kosten gunstiger dan een grotere diameter. Voor het ontwerpverval ($H=7 \text{ m}$, $Q=65 \text{ m}^3/\text{s}$) is de diameter van een axiale buisturbine ongeveer 30 cm kleiner dan van de Kaplan turbine. Hierbij is uitgegaan van één turbine, werkend bij het genoemde ontwerpverval en ontwerpdebiet.

7.7 Hoogteligging turbineas

Om het rendement van de turbine te verhogen wordt onder (of achter) de turbine gewoonlijk een zuigbuis geplaatst waarin onderdruk heerst. Het doel van deze zuigbuis is het benutten van de kinetische energie van het uitstromende water (dynamische zuighoogte of dynamic draft head). Het water stroomt met vrij hoge snelheid (en lage druk) door de turbine. Dit betekent dat het water veel kinetische energie bezit. In de zuigbuis wordt deze kinetische energie op een zo efficiënt mogelijke manier omgezet in drukhoogte zodat het totale drukverschil over de turbine toeneemt, waardoor het rendement van de turbine verhoogd wordt. Het benutten van de kinetische energie betekent dat de snelheid van het water langzaam afneemt door het geleidelijk vergroten van de dwarsdoorsnede van de zuigbuis.

Naarmate de turbineas hoger boven het benedenwater (kolkwaterstand) ligt, neemt de onderdruk (en dus het rendement van de turbine) toe. Door cavitatie is deze hoogteligging echter beperkt. Cavitatie is de vorming van dampbellen wanneer de waterdruk lager wordt dan de dampdruk. Deze dampbellen imploderen als ze in een gebied terechtkomen waar de waterdruk hoger is dan de dampdruk, wat leidt tot hoge impulsdrukken. Wanneer dit dichtbij de begrenzing tussen water en turbineblad of stroombuis plaatsvindt, kan grote schade ontstaan. Cavitatie kan eenvoudig voorkomen worden door de turbine zo laag mogelijk te plaatsen ten opzichte van het benedenwater, omdat de druk daar hoger is. Vanuit werktuigbouwkundig opzicht zal dat dus altijd zo uitgevoerd worden. Vanuit civieltechnisch oogpunt echter zal men de turbine zo hoog mogelijk willen plaatsen in verband met de benodigde ontgraving. Ook met betrekking tot de waterbouw en energiewinning zal de turbine zo hoog mogelijk geplaatst worden om het aanwezige verval optimaal te benutten. De turbine zal dus zo hoog mogelijk geplaatst worden, maar de plaatshoogte is dus gelimiteerd door het gevaar voor cavitatie. In formulevorm:

$$z_{\max} = B - \sigma_t \cdot H_{\text{net}} \quad (\text{m}) \quad [7.3]$$

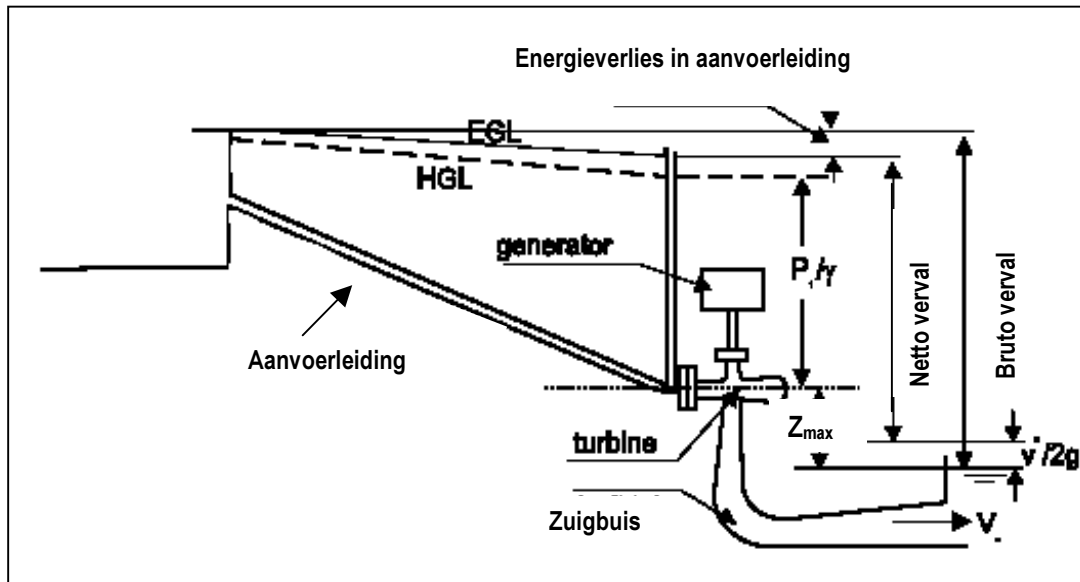
Met:

B = barometrische drukhoogte (m)

σ_t = Thoma's sigma

H_{net} = netto verval over de turbine (m)

In figuur 7-5 is de definitie van $Z_{\max}$ zichtbaar.



Figuur 7-5 Definitie schets waterkrachtcentrale

De barometrische drukhoogte B wordt gegeven door vergelijking 7.4:

$$B = 0,95(10,3 - 1,1 \frac{S}{1000}) \quad (\text{m}) \quad [7.4]$$

Met:

S = hoogte van de centrale boven zeeniveau (m)

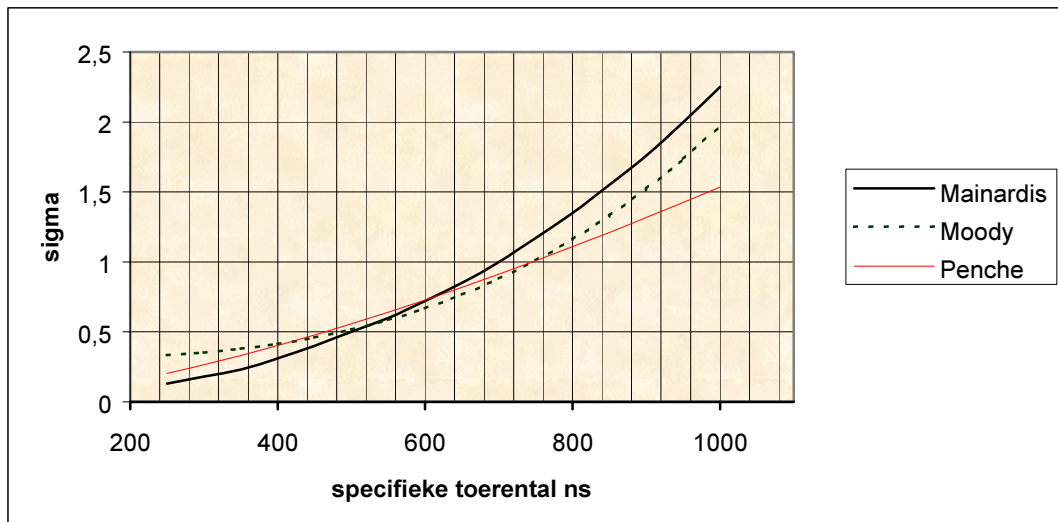
De drukhoogte neemt elke 1000 m hoger af met 1,1 m (laatste term in bovenstaande vergelijking). Op zeeniveau is deze drukhoogte gelijk aan 10,3 m. Voor het opvangen van variaties (circa 5 %) in de atmosferische druk wordt de factor 0,95 toegevoegd.

De barometrische drukhoogte is in Maasbracht gelijk aan:

$$B = 0,95(10,3 - 1,1 \frac{35}{1000}) = 9,7 \text{ m} \quad [7.5]$$

Thoma's sigma is een kental van de turbine welke de kritische waarde aangeeft voor het optreden van cavitatie. De waarde van deze variabele wordt experimenteel vastgesteld, maar is ook bekend via het specifieke toerental n_s . In figuur 7-6 is deze relatie weergegeven volgens diverse literatuurbronnen.

Uit vergelijkingen [7.3] en [7.5] blijkt $Z_{\max}$ uitsluitend af te hangen van σ en H_{net} . In figuur 7-6 is te zien dat σ een functie is van het specifieke toerental n_s . Omdat geldt dat een hogere waarde van σ leidt tot een kleinere toelaatbare hoogte van de turbineas boven het benedenwater, zal de curve van Mainardis worden toegepast, welke voor hoge specifieke toerentallen de grootste waarden van σ geeft. In de literatuurstudie is de definitie van n_s gegeven, waaruit blijkt dat n_s een functie van n , P en H is. Het vermogen P is weer een functie van Q en H , zodat $Z_{\max}$ afhankelijk gesteld wordt van het verval en debiet.



Figuur 7-6 Cavitatieparameter σ als functie van het specifieke toerental n_s

Er zullen nu twee berekeningen gemaakt worden voor het bepalen van $z_{\max}$. In de eerste berekening wordt $z_{\max}$ onafhankelijk gesteld van het debiet dat door de turbine stroomt.

Hiervoor wordt onderstaande set vergelijkingen gebruikt:

$$n_s = \frac{2283}{H^{0,486}} \quad (1/\text{min}) \quad (\text{Kaplan turbines}) \quad [7.6]$$

$$n_s = \frac{1520,26}{H^{0,2837}} \quad (1/\text{min}) \quad (\text{axiale buisturbines}) \quad [7.7]$$

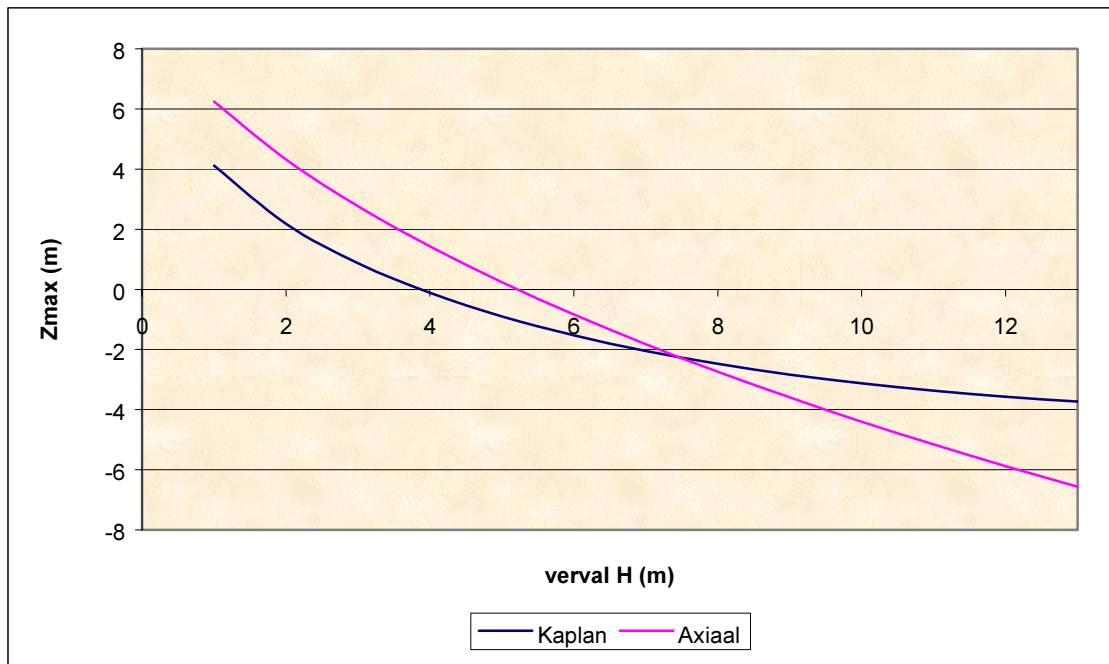
De kromme van Mainardis in figuur 7-6 wordt gegeven door onderstaande vergelijking:

$$\sigma = 3 \cdot 10^{-6} n_s^2 - 0,0008 n_s + 0,1633 \quad [7.8]$$

Vergelijking [7.8] is gebaseerd op curvefitting, de lijn in figuur 7-6 is gebaseerd op meetpunten (Bron: lit. 7.4).

Omdat σ en n_s nu als functie van H bekend zijn, kan ook $z_{\max}$ als functie van H berekend worden. In figuur 7-7 is het resultaat van deze berekening gegeven voor zowel de Kaplan turbine als de axiale buisturbine.

In deze figuur is te zien dat de kritieke situatie optreedt bij maximaal verval. Op basis van dit criterium zou gekozen moeten worden voor de Kaplan turbine, omdat voor deze turbine de vereiste aanlegdiepte kleiner is. In bovenstaande berekening is gebruik gemaakt van turbinespecifieke vergelijkingen ([7.6] en [7.7]) zonder dat het debiet in de berekening betrokken wordt.



Figuur 7-7 Maximale hoogte turbineas boven benedenwater als functie van verval

In het tweede deel van de berekening zal $z_{\max}$ wel van het debiet afhankelijk gemaakt worden. Nu geldt de volgende set vergelijkingen:

$$n_s = n \frac{P^{0.5}}{H^{1.25}} \quad (1/\text{min}) \quad [7.9]$$

$$P = 8QH \quad (\text{kW}) \quad [7.10]$$

Uit de combinatie van vergelijkingen [7.6], [7.9] en [7.10] volgt voor het toerental n van een Kaplan turbine:

$$n = \frac{807,16 \cdot H^{0,264}}{\sqrt{Q}} \quad (1/\text{min}) \quad [7.11]$$

Evenzo geldt, met vergelijkingen [7.7], [7.9] en [7.10] voor het toerental n van een axiale buisturbine:

$$n = \frac{537,49 \cdot H^{0,466}}{\sqrt{Q}} \quad (1/\text{min}) \quad [7.12]$$

Voor diverse combinaties van verval en debiet kan met [7.11] en [7.12] het toerental n worden uitgerekend. Indien de generator direct gekoppeld is aan de turbineas, geldt voor het toerental van de turbine:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (1/\text{min}) \quad [7.13]$$

Met:

p = aantal poolparen van de generator

f = frequentie van de generator, in Nederland $f = 50$ Hz.

Omdat p een geheel getal moet zijn, wordt met vergelijking [7.13] een gecorrigeerd toerental berekend op basis van de vergelijkingen [7.11] en [7.12]. Vervolgens wordt n_s uitgerekend met behulp van vergelijking [7.9].

Met [7.3] en [7.8] kan dan $z_{\max}$ bepaald worden (als functie van Q en H). In bijlage F zijn de resultaten van bovenstaande berekeningen opgenomen. Hierin is duidelijk te zien dat de waarde $z_{\max}$ vooral van het verval afhankelijk is. Het debiet speelt wel een rol, maar die rol is duidelijk beperkt ten opzichte van het verval. De onregelmatigheden in de figuren in bijlage F zijn het gevolg van het feit dat het aantal poolparen een geheel getal

moet zijn. Dit heeft invloed op het toerental (vergelijking [7.13]) en dus ook op het specifieke toerental, Thoma's sigma en de maximaal toelaatbare hoogte $z_{\max}$.

Het debiet heeft minder invloed op de hoogteligging van de turbineas dan het verval.

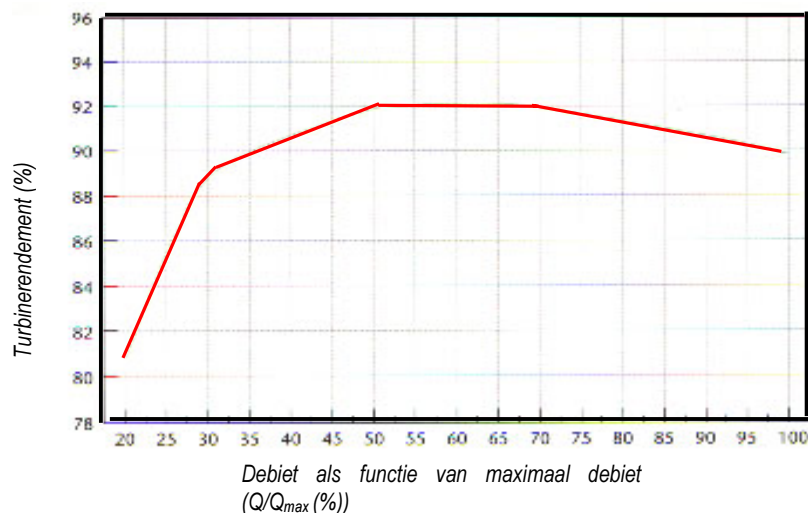
Voor de bepaling van de aanleghoogte van de turbineas boven het benedenwater zal gebruik gemaakt worden van de getallen in bijlage F.

NB: er is steeds gesproken over de maximale hoogte van de turbineas boven het benedenwater om cavitatie te voorkomen. Bij verticaal opgestelde Kaplan turbines is dit juist, omdat het gevaar voor cavitatie uitsluitend aan de kant van het benedenwater kan optreden. Bij axiale buisturbines waarbij de as horizontaal of onder een hoek met de horizontaal staat, is dit niet helemaal juist. Indien de turbine zich op het kritieke punt van cavitatie bevindt, betekent dit dat de delen die lager zijn gelegen dan de turbineas geen cavitatie ondervinden, maar de delen daarboven wel. De waarde $z_{\max}$ slaat in dat geval op de maximaal toelaatbare hoogte van de cavitatiegevoelige onderdelen van de constructie.

7.8 Turbinerendement

7.8.1 Kaplan turbines

Een belangrijke eigenschap van de Kaplan turbine is dat zowel de leidschoepen als de loopschoepen verstelbaar kunnen zijn. Als het doorgevoerde debiet buiten het ontwerppunt komt (zowel groter debiet als kleiner debiet) is het mogelijk om de leidschoepen en/of de loopschoepen te verstellen (dit gebeurt automatisch op basis van debietmetingen) om het rendement van de turbine zo hoog mogelijk te houden. Figuur 7-8 geeft het rendementsverloop voor dubbel gereguleerde turbines als functie van de verhouding tussen het doorgevoerde debiet en het maximale door te voeren debiet.

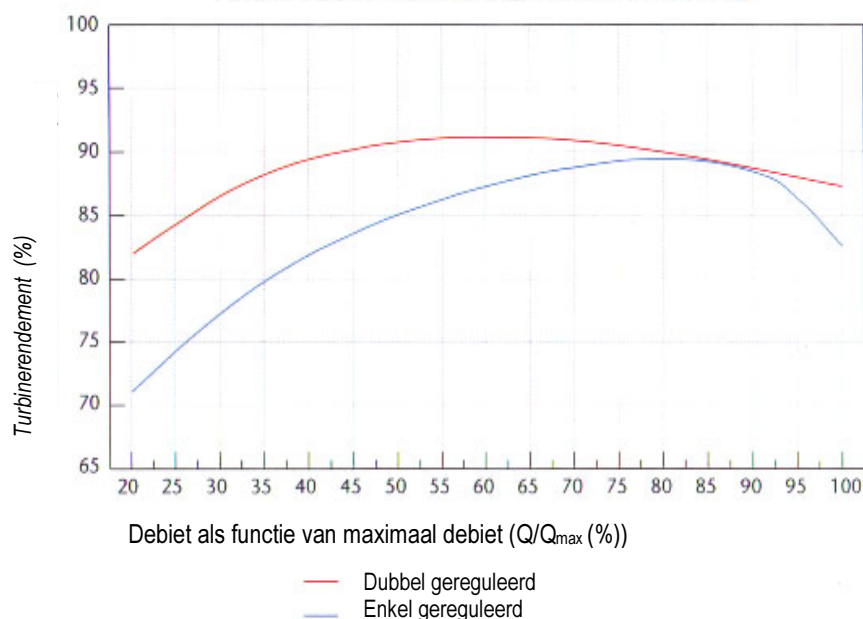


Figuur 7-8 Rendement Kaplan turbine

Bron: {lit. 7.3}

7.8.2 Axiale buisturbines

In de figuren 7-8 en 7-9 is te zien dat het rendement van beide turbintypen ongeveer gelijk is. Dit komt omdat van beide zowel de leidschoepen als de loopschoepen verstelbaar zijn.



Figuur 7-9 Rendement Axiale buisturbine
Bron: {lit. 7.3}

Indien gekozen wordt voor het nader uitwerken van de axiale buisturbine, zal voor het bepalen van het turbinerendement gebruik gemaakt worden van de rode kromme in figuur 7-9. Deze kromme is representatief voor het verloop van het turbinerendement als functie van het door de turbine gevoerde debiet.

7.9 Overbrenging

De aan de turbine gekoppelde generator moet met een constant toerental draaien. Wanneer de turbine direct gekoppeld is aan de generator betekent dit dat ook de turbine met een constant toerental moet draaien. Omdat debiet en verval geen constante waarde hebben is directe koppeling dus niet mogelijk. Tussen generator en turbine moet een overbrenging geïnstalleerd worden. Het ontwerp van deze overbrenging is een werktuigbouwkundig onderwerp en zal hier niet worden uitgewerkt. Wel kan gesteld worden dat door het grote verloop van verval en debiet veel zorg besteed moet worden aan het ontwerp van de overbrenging. Het installeren van een frequentieomvormer kan ook in overweging genomen worden. Door deze omvormer, welke veel toegepast wordt bij pompturbines, kan het toerental van de turbine zodanig worden ingesteld dat de turbine bij het momentane verval hetzelfde rendement heeft als het ontwerpverval. Dit is echter een zeer dure oplossing, waarvoor de kosten tegen de baten afgewogen moeten worden. Het ontwerp hiervan valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

7.10 Keuze turbineontwerp

Op basis van de gegevens uit de voorgaande paragrafen kan nu een keuze voor een bepaald turbintype gemaakt worden.

Voor de sluiscentrale in Maasbracht zijn twee turbintypen mogelijk: de verticale Kaplan en de axiale buisturbine. De as van de axiale buisturbine kan zowel horizontaal, verticaal als onder een hoek geplaatst zijn. Als deze alternatieven gecombineerd worden met de mogelijke configuraties van de centrale, ontstaan vele alternatieven voor het ontwerp van de sluiscentrale. In bijlage G2 is dit weergegeven in een aantal principeschetsen. De keuze is in het voorgaande hoofdstuk al gevallen op de overstroombare centrale. Er kan hier dus volstaan worden met het bepalen van het turbintype en de diameter van de waaier. Daaruit volgen rendement en vereiste diepteligging van de turbine. Uit oogpunt van symmetrische instroom zal gekozen worden voor het installeren van twee turbines. Bijkomend voordeel is dat de kolk nog wel gevuld kan worden door één turbine terwijl onderhoud aan de andere turbine plaatsheeft.

Turbintype

Omdat het rendement van axiale en Kaplan turbines ongeveer gelijk is, is door de keuze voor de overstroombare centrale het selecteren van een turbinetype vooral een kwestie van beschikbare ruimte in de centrale.

Bij de Kaplan turbine wordt doorgaans een elleboogvormige zuigbuis toegepast om een kolom water tussen benedenwater en turbineas te handhaven (verval) en om de kinetische energie van het stromende water te benutten. De hoogte van deze buis is uit te drukken als functie van de diameter van de waaier: als vuistregel kan voor die hoogte $2,6 \cdot D$ aangenomen worden.

In bijlage F is te zien dat om cavitatie te voorkomen, de turbineas ongeveer 1 m onder de laagste kolkwaterstand dient te liggen.

Bij de laagste kolkwaterstand staat er 4 m water in de kolk. Dit betekent dat de turbineas 3 m boven de kolkvloer ligt. Als de onderkant van de zuigbuis op het niveau van de kolkvloer ligt, betekent dit dat de diameter van de turbine maximaal 1,15 m mag zijn:

$$2,6 \cdot D \leq 3 \rightarrow D \leq \frac{3}{2,6} = 1,15 \text{ m} \quad [7.14]$$

Voor het ontwerpdebiet en ontwerpverval is dit te klein. Er zal door dit ruimtegebrek niet gekozen worden voor toepassing van Kaplan turbines, zodat de keuze op de axiale buisturbine valt. Het verloop van het turbinerendement is in figuur 7-9 gegeven.

Door de vereiste diepteligging om cavitatie te voorkomen wordt voor een laaggeplaatste horizontale as gekozen.

De bepaling van de benodigde diameter van de axiale turbine wordt in het volgende hoofdstuk, het hydraulisch ontwerp, verder uitgewerkt. Hierbij gelden de volgende uitgangspunten:

- Twee axiale buisturbines
- Ontwerpdebiet = $65 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ontwerpverval = 7 m

7.11 Literatuur

- {7.1} Pomp Accumulatie Centrale Brouwerdam en IJsselmeer, deelrapportage pompturbines. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, directie Bruggen.
- {7.2} Schweiger, F. en Gregori, I., *Comparison of turbine parameters for small and large axial units*. In: Water power and dam construction, november 1992.
- {7.3} Newmills Hydro, Waterturbines. Brochure.
- {7.4} Mosonyi, E., *Water Power Development, volume one: low-head power plants*. Budapest: Akadémiai Kiadó, publishing house of the Hungarian Academy of Sciences, 1963.
- {7.5} Penche, C., *Layman's guidebook on how to develop a small hydro site*. Brussel: European Small Hydropower Association (ESHA), juni 1998.

8 Hydraulisch ontwerp sluiscentrale

In dit hoofdstuk zal het hydraulisch ontwerp van de centrale behandeld worden. Dit betreft het bepalen van de vorm en afmetingen van de riolen en het vaststellen van het hefprogramma van de schuiven. Hieruit volgen het verloop van het vuldebiet en de hydraulische verliezen van de centrale.

8.1 Doel van het hydraulisch ontwerp

Het doel van het hydraulisch ontwerp is het optimaliseren van het hydraulisch en turbinerendement, teneinde de energieproductie te maximaliseren.

Het turbinerendement wordt geoptimaliseerd door het zo lang mogelijk constant houden van het doorgevoerde debiet op en nabij het ontwerppunt van de centrale.

Het hydraulisch rendement wordt bepaald door de vorm en afmetingen van de riolen.

Om bovenstaande te bereiken staan de volgende ontwerpvariabelen ter beschikking:

- Diameter van de riolen. In hoofdstuk 7 is voor axiale buisturbines de relatie tussen debiet en turbinediameter gegeven. De riool diameter is gelijk aan de turbinediameter.
- Hefprogramma van de schuiven. Door de schuiven getrapt te heffen kan het verloop van het debiet beïnvloed worden. Het debiet kan dan zo lang mogelijk constant gehouden worden rond de ontwerpwaarde.
- Vormgeving van de riolen. De verliescoëfficiënten van vormveranderingen en bochten zijn bekend. Binnen de randvoorwaarden (zie volgende paragraaf) kan zo de meest geschikte configuratie van de riolen gezocht worden met minimale verliezen.

Het verloop van het debiet, turbinerendement en hydraulisch rendement zijn afhankelijk van deze ontwerpvariabelen.

8.2 Randvoorwaarden aan het ontwerp

Met betrekking tot de randvoorwaarden aan het hydraulisch ontwerp worden drie groepen onderscheiden. Dit zijn de afmetingen van de centrale in het bovenhoofd, de toelaatbare vultijd en de langskrachten op de afgemeerde schepen in de kolk.

8.2.1 Afmetingen sluiscentrale

In verband met de aanwezigheid van het gemaal en de middenkolk, worden grenzen gesteld aan de afmetingen van de centrale. Ook in verticale richting zijn de afmetingen gelimiteerd, in verband met de vereiste waterdiepte boven de centrale voor de scheepvaart.

Een tweede reden om de afmetingen te begrenzen is de vergelijking met het 'traditionele' bovenhoofd: om kosten te besparen zal de centrale zoveel mogelijk gelijk moeten zijn aan het bestaande ontwerp van het bovenhoofd.

Dit leidt tot de volgende afmetingen van de sluiscentrale:

- | | |
|---|---------------|
| • Lengte: | 25 m |
| • Breedte (exclusief wanden): | 16 m |
| • Bovenkant centrale (beheerspeil – waterdiepte op de drempel): | NAP + 28,70 m |
| • Bovenkant kolkvloer, moet aansluiten op centrale vloer: | NAP + 16,80 m |
| • Onderkant snijranden: | NAP + 10,80 m |

In verband met het voorkomen van cavitatie moet de turbineas voldoende diep onder de laagste kolkwaterstand geplaatst worden.

8.2.2 Vultijd

In hoofdstuk 5 is gesteld dat de vultijd van de kolk maximaal 15 minuten, dus 900 sec. mag zijn. De capaciteit van de centrale moet hier op afgestemd zijn.

8.2.3 Langskracht op schepen

De langskracht op de afgemeerde schepen in de kolk moet kleiner zijn dan 1‰ van het gewicht (inclusief lading) van de schepen. Met het programma LOCKFILL worden deze krachten berekend.

8.3 Ontwerpmethode

Het ontwerpproces is een iteratieve procedure. Het ontwerp begint met het selecteren van een door de turbine te voeren debiet. Op basis van dit debiet wordt de benodigde waaierdiameter en buisdiameter berekend (zie bijlage F).

De volgende stap is het inpassen van de riolen in het bovenhoofd, conform de gestelde randvoorwaarden.

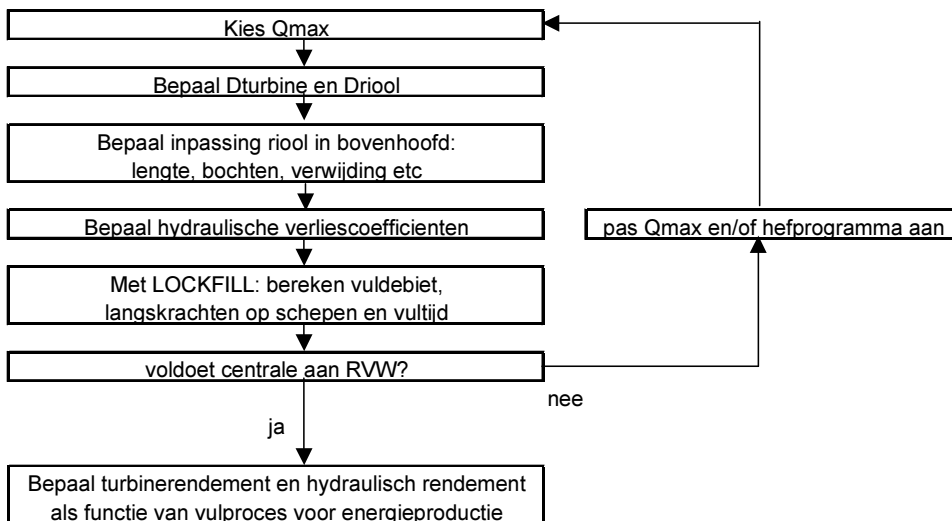
Van dit ontwerp worden vervolgens de verliescoëfficiënten ten gevolge van profielveranderingen en wandwrijving bepaald.

Met behulp van LOCKFILL kan het verloop van het vuldebiet bepaald worden.

Indien het ontwerp niet voldoet aan de gestelde randvoorwaarden met betrekking tot de vultijd en de langskrachten op de schepen in de kolk, wordt een aangepast debiet en/of hefprogramma van de schuiven geselecteerd. Deze procedure wordt herhaald totdat aan alle randvoorwaarden is voldaan.

Vervolgens kunnen het turbinerendement en hydraulisch rendement als functie van het vulproces gebruikt worden voor de bepaling van de energieproductie per cyclus.

In figuur 8-1 staat deze procedure schematisch weergegeven.



Figuur 8-1 Ontwerpschema voor hydraulisch ontwerp

8.4 Turbinerendement

In het voorgaande hoofdstuk is gesteld dat voor het bepalen van het turbinerendement uitgegaan wordt van figuur 7-9. De rode lijn in deze figuur geeft het rendement van een dubbel gereguleerde axiale buisturbine weer. In bijlage F5 is deze figuur eveneens opgenomen, waarbij de kromme is benaderd door vijf rechte lijnen. Voor elk debiet kan op deze manier het turbinerendement van de centrale bepaald worden. In bijlage G5 is eveneens op basis van de resultaten van LOCKFILL op elk moment van het vulproces het turbinerendement berekend.

8.5 Hydraulisch rendement

Het hydraulisch rendement zoals gegeven in de doelfunctie (hoofdstuk 6) heeft betrekking op de verhouding tussen het netto verval dat door de turbine wordt benut en het bruto verval:

$$\eta_h = \frac{H_n}{H_{br}} = \frac{H_{br} - \Delta H}{H_{br}} = 1 - \frac{\Delta H}{H_{br}} \quad [8.1]$$

Het verschil ΔH tussen bruto en netto energiehoogte bestaat uit de som van twee componenten: wrijvingsverliezen en vormverliezen:

$$\Delta H = \Sigma \Delta H_w + \Sigma \Delta H_v \quad [8.2]$$

8.5.1 Wrijvingsverlies

In een uniforme leiding met diameter D treedt energieverlies op als gevolg van wandwrijving. Dit energieverlies per eenheid van lengte wordt het wrijvingsverhang i_w genoemd:

$$i_w \equiv -\frac{dH}{ds} = f \frac{U^2}{2gD} \quad [8.3]$$

In deze vergelijking is f een weerstandscoefficiënt, de coëfficiënt van Darcy-Weisbach. Deze coëfficiënt is afhankelijk van de wandruwheid (k) en diameter (D) van de leiding en van het getal van Reynolds, $Re = UD/\nu$ (met U = stroomsnelheid van de vloeistof en ν is de kinematische viscositeit). Met behulp van het Moody diagram is dan de waarde van f af te lezen. White en Colebrook hebben echter een uitdrukking gevonden voor f , waardoor het gebruik van het Moody diagram overbodig wordt:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(0,27 \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad [8.4]$$

Door te itereren kan de waarde van f als functie van k , D en Re bepaald worden. In tabel 8-1 is voor een aantal materialen de wandruwheid k gegeven. In dit ontwerp wordt uitgegaan van buizen van geklonken staal met een wandruwheid van 1 mm.

Tabel 8-1 Wandruwheid

Materiaal	Wandruwheid k (mm)
Beton, oud/slecht	10-20
Beton, onafgewerkt	3
Beton, gepleisterd	0,5
Beton, zeer glad	0,2
Glad staal	0,1
Geklonken staal	1,0
Sterk geroest staal	1-2

Bron: *Hydraulica*, prof.ir. J.Th. Thijsse

Het totale wrijvingsverlies over de uniforme buis met lengte L is nu gelijk aan:

$$\Delta H_w = i_w L = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad [8.5]$$

In vergelijking [8.5] is de laatste term, $U^2/2g$ de snelheidshoogte. De snelheidshoogte stelt de kinetische energie van het water voor.

Hieruit blijkt dat een lage stroomsnelheid, korte leiding en grote diameter gunstig zijn voor het minimaliseren van wandwrijving. Bij korte leidingen blijkt dat verliezen ten gevolge van wandwrijving veel kleiner zijn dan verliezen t.g.v. vormveranderingen. Deze worden in de volgende paragraaf behandeld.

8.5.2 Vormverliezen

Behalve door wandwrijving verliest het water ook energie door vormveranderingen van de aanvoerleiding. Dit treedt op bij bochten, knikken, splitsingen, abrupte profielveranderingen (vernauwing, verwijding) en geleidelijke profielveranderingen. Daarnaast is er ook nog sprake van intree en uittreeverliezen. Analoog aan de wandwrijving worden de vormverliezen ook uitgedrukt in een verliescoëfficiënt vermenigvuldigd met snelheidshoogte. Voor elk 'obstakel' wordt het verlies aan valhoogte als volgt uitgedrukt:

$$\Delta H_v = \xi \frac{U^2}{2g} \quad [8.6]$$

8.6 Ontwerpalternatieven

8.6.1 Ontwerpdebiet en diameter turbine

Het doorlopen van het in paragraaf 8.3 gegeven ontwerpproces heeft geleid tot het volgende turbineontwerp:

Aantal turbines:	2
Turbinediameter D :	2,56 m
Maximaal turbinedebiet $Q_{\max}$:	45 m ³ /s (per turbine)

Uitstroomopening (zuigbuis): $2D \times 2D = 26,2 \text{ m}^2$

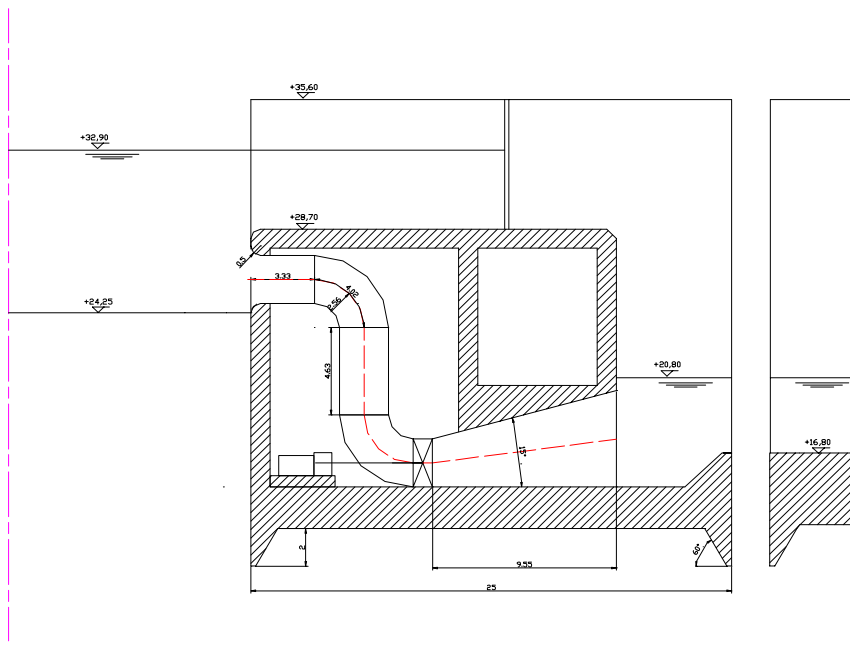
8.6.2 Inpassing in bovenhoofd

Uitstroomopening is $2D$ breed en $2D$ hoog, waarbij D de waaierdiameter voorstelt. Dit is een veel gebruikte vuistregel voor de dimensionering van de uitstroomopening. In paragraaf 7.7 is het doel van de zuigbuis en uitstroomopening gegeven.

Omdat in de zuigbuis een onderdruk heerst, is het van belang dat de uitstroomopening van de zuigbuis altijd onder water blijft (en voldoende diep) om te voorkomen dat lucht wordt aangezogen, waardoor de turbine stil zou kunnen vallen. Voor de minimale afstand tussen de bovenkant van de uitstroomopening en de laagste kolkwaterstand zal $0,5 \text{ m}$ worden aangehouden.

Voor het inpassen van de centrale zijn door de beperkte ruimte van het bovenhoofd en de grote turbinediameter niet veel verschillende alternatieven beschikbaar. Er zijn twee alternatieven ontwikkeld, waarbij het enige verschil de hoek van verwijding van de zuigbuis is, zie bijlage G3. De keuze zal in dat geval vallen op het alternatief met het kleinste verlies in de zuigbuis, dus alternatief B in bijlage G3. Dit alternatief staat ook in figuur 8-2.

Figuur 8-2 Ontwerp inpassing centrale in bovenhoofd



In verband met de beperkte ruimte boven de instroomopeningen wordt geen gebruik gemaakt van een hefschuif maar van een 'zakschuif'. In de aanvoerleiding is dus boven de schuif sprake van een overlaat.

8.6.3 Hydraulische verliescoëfficiënten

Met behulp van de in bijlage G1 gegeven verliescoëfficiënten kan het totale verlies worden berekend. Voor het gegeven ontwerp hebben deze coëfficiënten de volgende waarden:

$$\xi_{\text{intree}} = 0,05 \quad (r/D > 0,2)$$

$$\xi_{\text{bochten}} = 0,42 \quad (r/d = 1, \alpha = 90^\circ)$$

$$\xi_{\text{turbineas}} = 0,10$$

$$\xi_{\text{verwijding}} = 0,56 \quad (\alpha = 15^\circ)$$

$$\xi_{\text{uittree}} = 1$$

$$\xi_{\text{wrijving}} = f \frac{L}{D} = 0,01 \frac{26,55}{2,56} = 0,10$$

De factor f blijkt, bij debieten variërend tussen 0 en 65 m³/s, nauwelijks afhankelijk te zijn van de stroomsnelheden in de riolen. Voor f wordt dan ook een constante waarde aangehouden.

De totale verliescoëfficiënt (exclusief de verliezen bij de schuif) is gelijk aan de som van deze coëfficiënten, dus 2,23.

De verliescoëfficiënt bij de schuif wordt berekend met:

$$\xi_{sch} = \left(\frac{A_{br}}{\mu A_{mom}} - 1 \right)^2$$

De verliescoëfficiënt is dus een functie van de totale doorsnede (A_{br}) en de momentane doorsnede (A_{mom}) en dus van de hefhoogte.

De coëfficiënt μ is afhankelijk van de hefhoogte als functie van de totale hefhoogte en varieert van 0,6 voor sterk gecontraheerde stroming tot 1 voor stroming met evenwijdige stroomlijnen.

8.6.4 LOCKFILL berekening

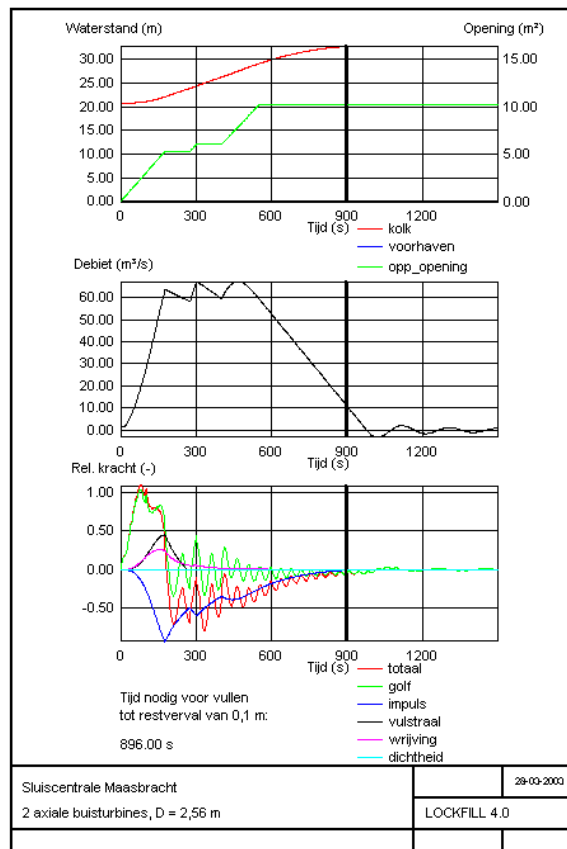
Met de gegevens uit de voorgaande subparagrafen is in LOCKFILL het verloop van het vuldebiet en langskrachten berekend. Het resultaat hiervan is in figuur 8-3 weergegeven.

Deze figuur is ook in bijlage G4 opgenomen. Te zien is, dat de tijd voor vullen tot het restverval = 0,10 m, gelijk is aan 896 s, dus net minder dan de maximaal toelaatbare vultijd. Het bij dit verloop behorende verloop van opening van de riolen is in tabel 8-2 weergegeven.

Tabel 8-2 Programma schuiven

Tijdstip (s)	Snelheid schuif (m/s)
0	0,008
175	0
275	0,007
300	0
400	0,007
550	0

NB: Tussen deze tijdstippen blijven de snelheden constant



Figuur 8-3 Resultaten LOCKFILL

8.7 Rendement gekozen alternatief

8.7.1 Hydraulisch rendement

Nu de vormgeving van de riolen en verliescoëfficiënten bekend zijn, kan het hydraulisch rendement met vergelijking [8.1], [8.2], [8.5] en [8.6] berekend worden. Het verlies aan valhoogte heeft betrekking op de stroomsnelheid bij de betreffende vormverandering. Omdat de doorsnede van het riool niet overal hetzelfde is (verwijding, uittree), zal ook de stroomsnelheid in het riool met de plaats variëren.

Er worden nu drie doorsneden gedefinieerd:

'standaard' riooldoorsnede:

$$A_1 = \frac{1}{4} \pi D^2 = 5,15 \text{ m}^2$$

Met uitzondering van de verliescoëfficiënten voor de verwijding en uittree, hebben alle coëfficiënten op deze doorsnede betrekking

Doorsnede ter plaatse van de verwijding. Hiervoor wordt de gemiddelde doorsnede aangehouden tussen standaard buisdiameter en de doorsnede van de uitstroomopening:

$$A_2 = \frac{5,15 + 26,2}{2} = 15,68 \text{ m}^2$$

Doorsnede van de uitstroomopening:

$$A_3 = 2D \cdot 2D = 26,2 \text{ m}^2$$

Het hydraulisch rendement wordt nu:

$$\eta_h = \left(1 - \frac{1}{H_{br}} \left(\left\{ f \frac{L}{D} + \xi_{in} + \xi_{bocht} + \xi_{turbineas} + \xi_{schuif} \right\} \frac{u_1^2}{2g} + \xi_{diff} \frac{u_2^2}{2g} + \xi_{uit} \frac{u_3^2}{2g} \right) \right) \cdot 100 (\%) \quad [8.7]$$

Met:

H_{br} = bruto valhoogte (m)

f = coëfficiënt van Darcy-Weisbach (-)

L = totale lengte riool (m)

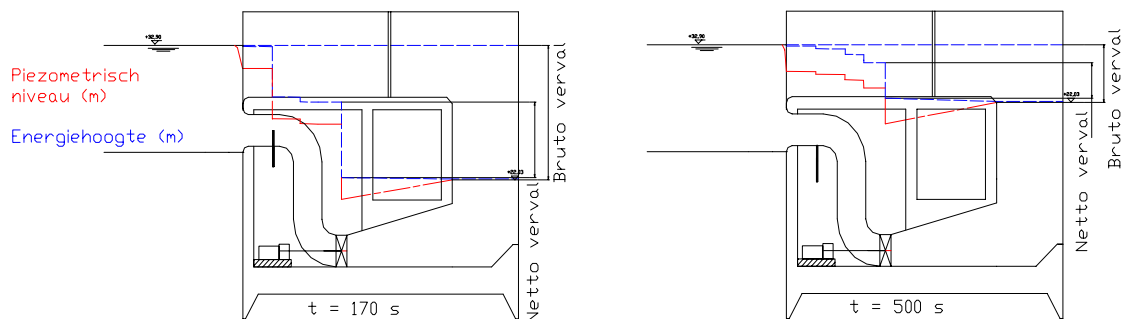
D = diameter standaard riooldoorsnede (m)

u_1 = stroomsnelheid in 'normale' riooldoorsnede = Q/A_1 (m/s)

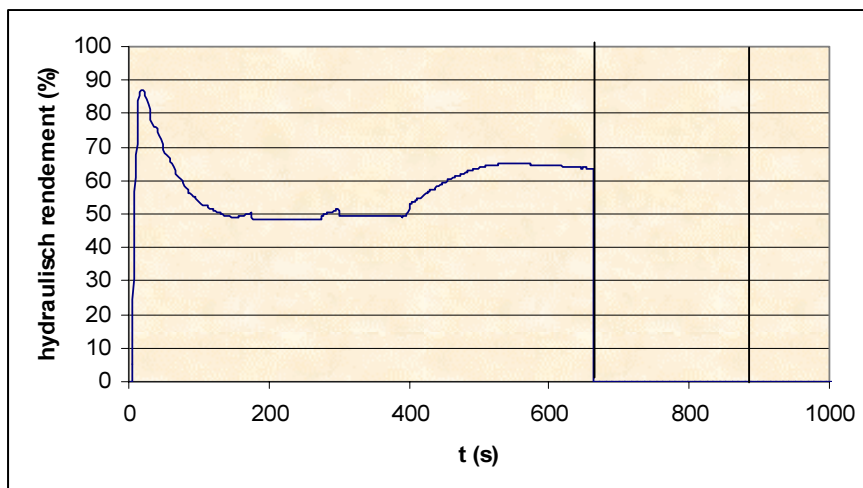
u_2 = gemiddelde stroomsnelheid in verwijding = Q/A_2 (m/s)

u_3 = stroomsnelheid uittredende straal = Q/A_3 (m/s)

In figuur 7-5 is de definitieschets gegeven van het verschil tussen bruto en netto verval over de centrale. Nu de verliescoëfficiënten van de centrale bekend zijn kan deze figuur ook voor het ontwerp van de centrale gemaakt worden. Het verlies aan valhoogte als gevolg van wrijving en vormverliezen is in figuur 8-4 voor twee momenten van de vultijd opgenomen: op $t = 170$ s en op $t = 500$ s. In figuur 8-5 is het verloop van het hydraulisch rendement van het geselecteerde ontwerp als functie van de vultijd gegeven.



Figuur 8-4 Energiehoogte verlies



Figuur 8-5 Hydraulisch rendement sluiscentrale

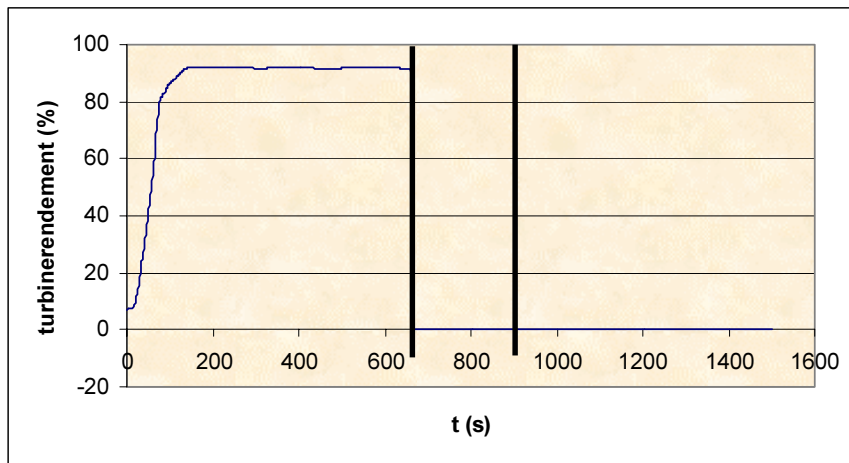
Opmerkingen bij figuur 8-5:

In de figuur is het verloop van het hydraulisch rendement aangegeven als functie van de vultijd. Het moment van openen van de deuren ($t = 896$ s) is aangegeven, evenals het moment dat het verval over de sluis nog 2 m bedraagt ($t=664$ s). Dit is het minimaal benodigde verval voor de turbine.

Aan het begin van het vulproces schiet het hydraulisch rendement sterk omhoog door het openen van de riolen. Vervolgens neemt het rendement af tot ongeveer 50%, waarbij kleine pieken te zien zijn op de momenten dat de schuiven in de riolen wat verder worden geopend. Vanaf $t = 400$ s worden de riolen nog weer wat verder geopend waardoor het rendement toeneemt.

8.7.2 Turbinerendement

Het verloop van het turbinerendement is gegeven in figuur 8-6. Het verloop van dit rendement is een functie van het verloop van het vuldebiet in de tijd. Het rendement wordt dus gedurende het grootste deel van de tijd vrijwel constant gehouden door het aanpassen van het vuldebiet.



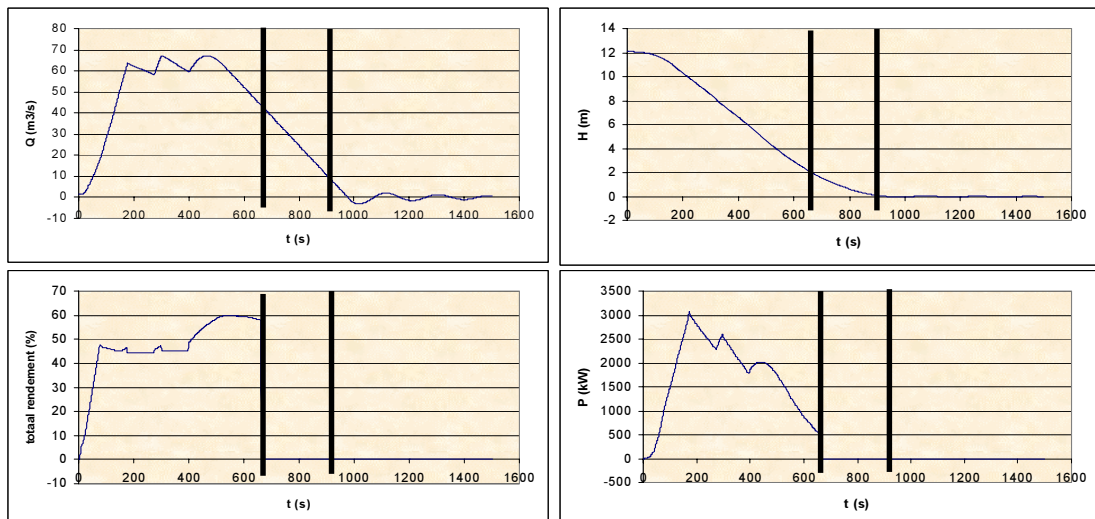
Figuur 8-6 Turbinerendement sluiscentrale

8.8 Totaal ontwerp

8.8.1 Opbrengst van de centrale

De resultaten van de vorige paragraaf zijn in bijlage G opgenomen en gebruikt voor de berekening van de opbrengst van de centrale. Het verloop van het verval, debiet, turbinerendement en hydraulisch rendement zijn eveneens in deze bijlage opgenomen. In figuur 8-7 zijn deze grafieken eveneens te zien. Met de klok mee, vanaf linksboven: verloop van het debiet, verval, vermogen en rendement van de centrale.

Figuur 8-7 Opbrengst van de centrale



Energiewinning in de schutfase

Per schutcyclus wordt 313 kWh energie geproduceerd, afgerond is dit 300 kWh

De jaarlijkse energieopbrengst uit het schutten wordt dan, conform de doelfunctie:

$$E = 0,95 \cdot 3000 \cdot 300 = 855.000 \text{ kWh}$$

Energiewinning in de spuifase

In tabel 8-3 is de energieopbrengst uit het spuien opgenomen. Per jaar kan 8,4 GWh elektrische energie opgewekt worden uit de sluis. In de tabel is eveneens aangegeven of gebruik gemaakt wordt van één of twee turbines. Bij

dat omslagpunt is bekeken hoe hoog het turbinerendement is bij gebruik van één of van twee turbines. Het omslagpunt ligt bij 40 m³/s. Dit betekent dat een hoger rendement gehaald wordt door 20 m³/s door beide turbines te voeren dan een debiet van 40 m³/s door één turbine.

Tabel 8-3 Energieopbrengst uit spuien, maximaal spuidebiet 65 m³/s

	Aantal weken	Aantal uren	H (m)	Q (m³/s)	# turbines (-)	turb. rend. (%)	hydr. rend. (%)	P (kW)	E (kWh)
	1	34	12,1	15	1	87,1	97,3	1433	48.715
	1	34	12,1	20	1	90,4	95,1	1939	65.933
	1	34	12,1	25	1	92	92,4	2396	81.451
	1	34	12,1	30	1	92	89,0	2770	94.187
	1	34	12,1	35	1	90,9	85,0	3051	103.729
	1	34	12,1	40	2	90,4	95,1	3878	131.866
	1	34	12,1	45	2	91,3	93,8	4347	147.782
	1	34	12,1	50	2	92	92,4	4791	162.903
	1	34	12,1	55	2	92	90,8	5179	176.083
	1	34	12,1	60	2	92	89,0	5540	188.375
	36	1224	12,1	65	2	91,8	87,1	5861	7.173.464
totaal	46	1564							8.374.488

Indien het vanuit nautisch oogpunt ontoelaatbaar is om een groter debiet dan 45 m³/s op het kanaal te laten (het ontwerpdebiet uit de haalbaarheidsstudie van NOVEM), wordt de opbrengst lager, zie tabel 8-4.

Tabel 8-4 Energieopbrengst uit spuien, maximaal spuidebiet 45 m³/s

	Aantal weken	Aantal uren	H (m)	Q (m³/s)	# turbines (-)	turb. rend. (%)	hydr. rend. (%)	P (kW)	E (kWh)
	1	34	12,1	15	1	87,1	97,3	1433	48.715
	1	34	12,1	20	1	90,4	95,1	1939	65.933
	1	34	12,1	25	1	92	92,4	2396	81.451
	1	34	12,1	30	1	92	89,0	2770	94.187
	1	34	12,1	35	1	90,9	85,0	3051	103.729
	1	34	12,1	40	2	90,4	95,1	3878	131.866
	40	1360	12,1	45	2	91,3	93,8	4347	5.911.264
totaal	46	1564							6.437.146

De totale energieopbrengst uit het spuien wordt nu per jaar dus ongeveer 2 GWh lager.

In eerste instantie zal voor de berekening van de opbrengst (zie hoofdstuk 10) worden uitgegaan van 65 m³/s als maximaal toelaatbaar debiet op het kanaal. In een gevoeligheidsanalyse zal in datzelfde hoofdstuk ook de haalbaarheid van de centrale bij een maximaal debiet van 45 m³/s worden berekend.

Energievoorziening voor Maasbracht

In hoofdstuk twee is gesteld dat de levering van de energie buiten het kader van dit onderzoek valt. Om een idee te krijgen van de omvang van de energieproductie zal hier berekend worden hoeveel huishoudens in Maasbracht van energie voorzien kunnen worden:

Totale opbrengst sluiscentrale: 9,2 GWh/jaar

Aantal huishoudens Maasbracht: 5.200

Gemiddeld stroomverbruik per huishouden: 3.500 kWh/jaar

Totaal stroomverbruik gemeente Maasbracht: 18.200.000 kWh = 18,2 GWh/jaar

De sluiscentrale kan dus ongeveer de helft (51%) van Maasbracht van energie voorzien.

Met betrekking tot deze berekende energievoorziening geldt dat dit alleen haalbaar is, indien de energie opgeslagen kan worden. De manier van energieproductie van de centrale (in pieken tijdens het schutten en in het weekend) is niet toereikend voor energielevering.

8.8.2 Samenvatting ontwerpgegevens

Alle gegevens van het hydraulisch ontwerp zijn nu bekend en worden hier samengevat in tabel 8-5:

Tabel 8-5 Samenvatting ontwerpgegevens

Aspect	Eenheid	Waarde
Aantal turbines	-	2
Maximaal debiet per turbine	m ³ /s	45
Maximaal verval	m	12,1
Hydraulisch rendement bij max. verval en max. debiet	%	76
Turbine rendement bij max. verval en max. debiet	%	87
Geïnstalleerd vermogen	kW	7000
Energiewinning tijdens schutten		
Energieproductie	kWh	855.000
Tijdsduur van energiewinning	hr	525
Gemiddeld vermogen	kW	1629
Capaciteitsfactor $c = P_{\text{gem}}/P_{\text{geïnstalleerd}}$	-	0,23
Belastingfactor $f = E/(8760 \cdot P_{\text{geïnstalleerd}})$	-	0,014
Energiewinning tijdens spuien		
Energieproductie	kWh	8.375.000
Tijdsduur van energiewinning	hr	1564
Gemiddeld vermogen	kW	5355
Capaciteitsfactor $c = P_{\text{gem}}/P_{\text{geïnstalleerd}}$	-	0,77
Belastingfactor $f = E/(8760 \cdot P_{\text{geïnstalleerd}})$	-	0,14
Totaal		
Energieproductie	kWh	9.230.000
Tijdsduur van energiewinning	hr	2089
Gemiddeld vermogen	kW	4418
Capaciteitsfactor $c = P_{\text{gem}}/P_{\text{geïnstalleerd}}$	-	0,63
Belastingfactor $f = E/(8760 \cdot P_{\text{geïnstalleerd}})$	-	0,15

Uit tabel 8-5 blijkt dat de capaciteit van de centrale voor gemiddeld 63% wordt benut. Als er niet door de sluis gespuid kan worden, daalt de capaciteitsfactor naar 23%. Tijdens het schutten wordt de centrale dus zeer inefficiënt benut: er is sprake van een grote overcapaciteit.

De belastingfactor is eveneens erg laag: er wordt per jaar gemiddeld 15% van het aanwezige waterkrachtpotentieel van de locatie onttrokken.

8.9 Conclusies en opmerkingen

Op basis van de berekeningen in dit hoofdstuk kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Lage belastingsfactor van de centrale: de hoeveelheid geproduceerde energie is laag ten opzichte van de hoeveelheid die jaarlijks geproduceerd kan worden op basis van het geïnstalleerde vermogen. Dit is het gevolg van het feit dat alleen tijdens het nivelleren en in de weekenden energie gewonnen kan worden.
- Lage capaciteitsfactor: het gemiddelde vermogen van de centrale ten opzichte van het geïnstalleerd vermogen is laag. Dit is het gevolg van het afnemend debiet en verval tijdens het schutten. De capaciteitsfactor in de spuifase is wel hoog, in deze fase zijn het verval en debiet constant.
- Hoog turbinerendement. Met de turbine zijn variaties in het debiet op te vangen door het verstellen van loopschoepen en leidschoepen, waardoor het rendement hoog blijft.
- Laag hydraulisch rendement. Dit is met name het gevolg van het gedeeltelijk openen van de riolen. De verliezen bij de schuif zijn erg hoog.
- De energieopbrengst uit het schutten is 10% van de energieopbrengst uit het spuien.

In dit onderzoek zijn het hydraulisch rendement en turbinerendement afzonderlijk geoptimaliseerd. Het gevolg hiervan is dat niet de optimale situatie is bereikt. De totale energieopbrengst is namelijk evenredig met het product van het hydraulisch en turbinerendement. In een optimalisatiestudie dient dit nader onderzocht te worden. In deze studie kan het verloop van het debiet tijdens het vullen van de kolk nader onderzocht worden: grotere variaties in het debiet hebben een lager turbinerendement tot gevolg, maar wellicht een hoger hydraulisch rendement door een ander hefprogramma van de schuiven.

8.10 Literatuur

- {8.1} Thijssen, J.Th., *Hydraulica*. Overdruk uit de Technische Vraagbaak 1951.
- {8.2} Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica, collegehandleiding*. Delft: TUDelft, collegedictaat CT2100, maart 1999.

9 Hydraulische stabiliteit van de constructie

In dit hoofdstuk staat de stabiliteit van de constructie centraal. De aansluiting op de omgeving komt in dit kader eveneens aan de orde.

9.1 Inleiding

Bij kunstwerken als schutsluizen en spuisluizen dient de veiligheid met betrekking tot de volgende bezwijkmechanismen getoetst te worden:

- Ontgronding voor/achter de constructie
- Afschuiven
- Kantelen
- Opdrijven
- Onder/achterloopsheid

9.1.1 Ontgronding

Tijdens het vullen en ledigen van de kolk treden stromingen op bij de instroom/uitstroomopeningen van de riolen. Om stabiliteitsverlies als gevolg van ontgronding door meevoering van gronddeeltjes te voorkomen, dient een bodembescherming te worden ontworpen. In het geval van de sluiscentrale is dit met name belangrijk, omdat de instroomopeningen niet ver boven de bodem zijn geplaatst. Omdat het Julianakanaal in ophoging ligt, dient het kanaal waterdicht te zijn. Om deze reden is de gehele bodem van het kanaal van een waterdichte laag asfalt voorzien. Boven deze asfaltlaag is een laag klei aangebracht welke het opbarsten van de asfaltlaag moeten voorkomen als het kanaal voor onderhoud droog gezet wordt. Ter plaatse van de instroom van de centrale wordt deze kleilaag vervangen door een betonlaag. In dat geval is het niet nodig om de kleilaag te beschermen door een bodembescherming.

9.1.2 Afschuiven

De constructie mag niet afschuiven. Dit betekent dat de horizontale kracht op de constructie niet groter mag zijn dan het gewicht van de constructie (de verticale kracht), vermenigvuldigd met een wrijvingsfactor. Omdat het bovenhoofd en de verlengde kolkmoet tegen de bestaande constructie worden gebouwd, is dit criterium niet relevant.

9.1.3 Kantelen

Indien de belasting op het grondvlak van de constructie een te grote excentriciteit heeft, kan de constructie kantelen. De draagkracht van de ondergrond hangt hiermee samen. Doorgaans wordt geëist dat het totale grondvlak van de constructie bijdraagt in de krachtsoverdracht. Hiervoor is het van belang dat de resultante van de belastingen (inclusief het gewicht van de constructie) binnen de kern van het grondvlak valt. Omdat het bovenhoofd en kolkmoet tegen de bestaande sluis worden aangebouwd, is kantelen geen criterium.

9.1.4 Opdrijven

Om opdrijven van de constructie te voorkomen, dient het gewicht van de centrale groter te zijn dan de opwaarts gerichte waterdruk. De veiligheid met betrekking tot dit bezwijkmechanisme zal in paragraaf 9.2 worden getoetst.

9.1.5 Onder/achterloopsheid

Als gevolg van het waterstandsverschil over de constructie kan er onder en achter de constructie een grondwaterstroming ontstaan. Als door deze stroming gronddeeltjes worden meegevoerd, kan onder of naast de constructie een pipe ontstaan; een buisvormig kanaal waardoor de stabiliteit van de constructie in gevaar komt. In paragraaf 9.3 wordt dit mechanisme behandeld.

9.2 Opdrijven

In de berekening wordt uitgegaan van droogstand van de sluiscentrale, zoals tijdens onderhoud aan de centrale of renovatie van de kolkwanden. Tevens wordt uitgegaan van de hoogst mogelijke grondwaterstand. De berekening wordt zodoende gemaakt voor het meest ongunstige geval. In de berekening worden veiligheidscoëfficiënten gebruikt voor de opwaartse waterdruk en het gewicht van de constructie:

Voor de opwaartse waterdruk wordt een veiligheidscoëfficiënt aangehouden van 1,2

Voor het gewicht van de centrale wordt een veiligheidscoëfficiënt aangehouden van 0,9

9.2.1 Waterdruk

In paragraaf 5.2.1 zijn de grondwaterstanden ter hoogte van het bovenhoofd gegeven. Voor het berekenen van de veiligheid tegen opdrijven zal de hoogste grondwaterstand worden aangehouden.

De berekening van de opwaartse waterdruk is nu als volgt:

Grondwaterstand:	NAP + 25,0 m
Onderkant vloer:	NAP + 10,80 m
Lengte vloer bovenhoofd:	25 m
Breedte vloer bovenhoofd:	22 m
Volumieke massa water (ρ_g):	10 kN/m ³
Opwaartse waterdruk:	$10 \cdot 22 \cdot 25 \cdot (25 - 10,80) = 78.100 \text{ kN}$

9.2.2 Gewicht constructie

Volumieke massa beton:	24 kN/m ³	
Wanden:	$24 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 25 \cdot (35,60 - 15) =$	74.160 kN
(2 wanden, 3 m dik, 25 m lang, 20,6 m hoog)		
Vloer:	$24 \cdot 16 \cdot 25 \cdot 2,5 =$	24.000 kN
(16 m breed, 25 m lang, 2,5 m dik)		
Centrale dak (drempel):	$24 \cdot 16 \cdot 19 \cdot 1 =$	7.296 kN
(16 m breed, 19 m lang, 1 m dik)		
Wanden loodrecht op sluisas:	$24 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 12,7 =$	<u>14.630 kN</u>
(3 wanden, 1 m dik, 16 m lang, 12,7 m hoog)		
Totaal:		120.086 kN

Voor de veiligheid tegen opdrijven geldt nu:

$$0,9 \cdot 120.086 > 1,2 \cdot 78.100, \text{ dus } 108.077 > 93.720 \text{ kN}$$

De constructie is dus voldoende veilig tegen opdrijven.

9.3 Onder/achterloopsheid

In de inleiding van dit hoofdstuk is reeds aangegeven wat onder/achterloopsheid inhoudt. Omdat het kanaal gedeeltelijk in ophoging ligt, zal onder/achterloopsheid in de normale situatie niet optreden.

9.3.1 Onderloopsheid

Onderloopsheid kan alleen optreden indien:

- In de bodembescherming een imperfectie (gat) zit of als de bodembescherming niet goed aansluit op het bovenhoofd, en;
- Het bovenhoofd niet goed aansluit op de verlengde kolk of;
- De verlengde kolk niet goed aansluit op de bestaande kolk.

Als het nieuwe bovenhoofd, de verlengde kolk en de bestaande kolk goed op elkaar aansluiten zal piping niet optreden. De kwelweg is dan te lang. Een slechte aansluiting kan het gevolg zijn van onregelmatige zettingen van de constructiedelen.

De aansluiting tussen de bodembescherming en het bovenhoofd worden in den droge gerealiseerd. Er mag derhalve vanuit gegaan worden dat deze aansluiting een hoge kwaliteit en nauwkeurigheid heeft.

Om onderloopsheid te voorkomen kan de ruimte tussen het afgezonken bovenhoofd en kolkmoet worden opgevuld met beton. Met onderloopsheid hoeft in dat geval geen rekening gehouden te worden.

9.3.2 Achterloopsheid

Voor het optreden van achterloopsheid gelden dezelfde voorwaarden als voor onderloopsheid.

9.4 Aansluiting op omgeving

Om onderloopsheid en achterloopsheid te voorkomen, moet veel aandacht besteed worden aan de aansluiting van bovenhoofd en kolk op de bestaande kolk en omgeving. Het nieuwe sluishoofd bevindt zich tussen de uitloop van het sluiseiland tussen midden- en oostkolk en het geleidewerk tussen oostkolk en het gemaal. Dit zijn beide dichte, waterkerende constructies. Door het nieuwe sluishoofd met betonnen wanden te verbinden met deze constructies kan een waterkering gerealiseerd worden. In bijlage G7 is dit grafisch weergegeven.

10 Economische analyse

In dit hoofdstuk wordt de economische haalbaarheid van de sluiscentrale geanalyseerd. In de eerste paragraaf wordt aangegeven welke variabelen hiervoor van belang zijn, in de daaropvolgende paragrafen worden achtereenvolgens de kostenraming van het bestaande ontwerp van kolkverlenging en de opbrengst en kosten van de sluiscentrale bepaald. Op basis van de berekende kosten en opbrengsten wordt de haalbaarheid van de sluiscentrale bepaald.

10.1 Inleiding

10.1.1 Variabelen

De economische haalbaarheid van de sluiscentrale is afhankelijk van de volgende vier variabelen:

- De initiële investering (I): omvat alle extra kosten (ontwerp, vergunningen, bouw, etc) die gemaakt worden om de centrale in gebruik te kunnen nemen.
- De jaarlijkse opbrengsten van de centrale uit energieverkoop (R): is gelijk aan de hoeveelheid geproduceerde energie, vermenigvuldigd met de verkoopprijs van de geleverde energie.
- De jaarlijkse kosten van onderhoud en bedrijf (o&b): de kosten die nodig zijn om de centrale draaiende te houden. Dit omvat zowel personeelskosten als materiaalkosten.
- De rentestand (r). De rente bepaalt de terugverdientijd van de centrale.

10.1.2 Berekeningen

Als eerste zullen voor de sluiscentrale de waarden van de variabelen uit paragraaf 10.1.1. worden berekend. Met deze variabelen kunnen vervolgens de volgende berekeningen worden uitgevoerd (zie ook bijlage A):

Terugverdientijd

De terugverdientijd kan op twee manieren berekend worden; zonder rente en met rente.

Als de berekening wordt gemaakt zonder inachtnaam van de rentestand, wordt de 'eenvoudige' terugverdientijd (simple payback period):

$$n = \frac{I}{R - o \& b} \quad [10.1]$$

Met:

I = initiële investering (€)

R = jaarlijkse opbrengst van de centrale (€)

o&b = jaarlijkse kosten voor onderhoud en beheer van de centrale (€)

als de rente (r) wel in de berekening meegenomen wordt, moet de terugverdientijd n berekend worden met vergelijking [10.2]:

$$\frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} = \frac{I}{(R - o \& b)} \quad [10.2]$$

Netto contante waarde (NCW)

De waarde van de centrale aan het einde van de economische levensduur. De netto contante waarde is het verschil tussen de jaarlijkse netto opbrengst (inkomsten min kosten van onderhoud en beheer) en de initiële investeringskosten. De jaarlijkse opbrengst wordt daarbij verdisconteerd naar het tijdstip waarop de investeringskosten zijn gemaakt.

Interne rentevoet

De interne rentevoet (of Internal Rate of Return, IRR) is het rentepercentage waarbij de investeringen in de gestelde economische levensduur worden terugverdiend. Het projectresultaat (de netto contante waarde) is dan 0.

Met genoemde begrippen en variabelen kan op drie verschillende manieren gerekend worden:

- 1) Bij gegeven rentestand en economische levensduur wordt de NCW berekend.
- 2) Bij gegeven rentestand en NCW (=0) wordt de terugverdientijd berekend
- 3) Bij gegeven NCW (=0) en economische levensduur wordt de interne rentevoet berekend.

10.1.3 Aannamen

Bij de berekeningen in de volgende paragrafen worden ter vereenvoudiging van de berekening een aantal variabelen constant verondersteld gedurende de economische levensduur van de centrale:

- Elk jaar gelijke energieproductie (E). In werkelijkheid is de energieproductie een variabele (afhankelijk van wateraanvoer en scheepvaart) en dus niet constant.
- Elk jaar gelijke kosten van onderhoud en beheer. Deze kosten zijn evenmin constant gedurende de levensduur (niet elk jaar vervanging van onderdelen, kosten van onderhoud en beheer zijn ook afhankelijk van aantal draaiuren per jaar).
- Rentestand gedurende economische levensduur constant.

De economische levensduur van de centrale is 30 jaar. Dit betekent dat de centrale binnen deze periode terugverdiend moet worden om geen verlies te leiden.

Er zal in deze raming geen rekening gehouden worden met inflatie. In een gevoeligheidsanalyse zal wel berekend worden wat het effect is van lagere inkomsten (de vergoeding voor de geleverde energie) en een lagere energieopbrengst.

10.2 Kostenraming bestaand ontwerp

De in deze paragraaf gegeven kostenraming van het bestaande ontwerp van kolkverlenging is door Rijkswaterstaat gemaakt. Op enkele punten is deze raming aangepast en omgerekend van guldens in euro's.

10.2.1 Systematiek van de kostenraming

Om kostenramingen van infrastructurele projecten te kunnen vergelijken is binnen Rijkswaterstaat het Project Ramingen Infrastructuur (PRI) opgezet. Dit heeft geleid tot het gebruik van een uniforme ramingsopbouw. Deze opbouw is als volgt gestructureerd:

Directe kosten	
Indirecte kosten	+
Primaire kosten	
Bijkomende kosten	
Diversen	+
Basisraming	
Onvoorzien	+
Subtotaal	
BTW	+
Raming van de kosten	

Toelichting op de onderdelen van de kostenraming:

Directe kosten:	kosten die in het bestek verrekenbaar zijn en aan een bepaald onderdeel zijn toe te wijzen (meestal: hoeveelheid*eenheidsprijs)
Indirecte kosten:	kosten die in het bestek verrekenbaar zijn, maar niet aan een bepaald onderdeel toe te wijzen zijn: winst en risico, algemene kosten, uitvoeringskosten, etc.
Primaire kosten:	Som van directe en indirecte kosten
Bijkomende kosten:	kosten die niet in het bestek verrekenbaar zijn: leges, grondkosten, engineering, etc.
Diversen:	kosten t.b.v. nadere detailuitwerking van het ontwerp
Basisraming:	Som van primaire kosten, bijkomende kosten en diversen
Onvoorzien:	kostenpost om onvoorziene wijzigingen in het project op te vangen

Voor de kostenraming van de verlenging van de oostkolk in Maasbracht is gebruik gemaakt van deze uniforme ramingsopbouw, waarbij onderscheid is gemaakt in vier disciplines: civiele techniek, staalbouw, werktuigbouw en installatietechniek. Zowel de omvang van de indirecte en bijkomende kosten als van de posten diversen en onvoorzien zijn in percentages terug te leiden tot de directe kosten. Indien de directe kosten bekend zijn, zijn dus ook alle andere posten en de totale kosten bekend. In bijlage H1 zijn de diverse percentages opgenomen. Deze percentages zijn voor de diverse disciplines verschillend. Bij de kostenraming in dit hoofdstuk gaat het, tenzij anders vermeld, om de totale raming van de kosten, dus inclusief BTW.

10.2.2 Raming civieltechnische componenten

De civieltechnische werken omvatten naast het bouwen van een nieuw bovenhoofd en verlengde kolkmoet ook het aanpassen van het bestaande bovenhoofd, benedenvoorhaven en bovenvoorhaven. In bijlage H2 is de door Rijkswaterstaat gemaakte raming opgenomen.

In deze raming zijn de kosten voor het bovenhoofd en de verlengde kolk aangepast.

Nieuwe bovenhoofd

De door Rijkswaterstaat gemaakte raming van de directe kosten van het bovenhoofd zijn gebaseerd op het bovenhoofd van de nieuwe schutsluis Lith:

Kosten van het nieuwe bovenhoofd Lith (afgerond): 4.206.000 (fl)

Constructiehoogte bovenhoofd Lith: 17,00 m

Constructiehoogte bovenhoofd Maasbracht: 24,80 m

Kosten van het nieuwe bovenhoofd Maasbracht: $\frac{24,80}{17,00} \cdot 4.206.000 = 6.127.000$ (fl)

De fouten die hiermee gemaakt worden zijn:

- Sluis Lith wordt gevuld door openingen in de puntdeuren. Er zijn dus geen omloopriolen aanwezig. Het bovenhoofd Lith is derhalve een betonnen U-bak, wat een simpele constructie is. De omloopriolen van het bovenhoofd in Maasbracht is een complexere en dus duurdere constructie.
- In de kostprijsberekening van het bovenhoofd Lith zijn de staal en werktuigbouwkundige kosten inbegrepen. Deze worden voor Maasbracht nog apart in rekening gebracht, wat dus dubbelop is.

Een betere schatting van de directe kosten van dit bovenhoofd is door het uittrekken van de hoeveelheden beton in het ontwerp, en dit te vermenigvuldigen met onderstaande richtprijzen:

Richtprijs voor 'goedkoop' te storten beton: € 225/m³

Richtprijs voor 'duur' te storten beton: € 450/m³

Het verschil tussen duur en goedkoop beton is afhankelijk van de vorm en hoeveelheid bekisting per m³ beton.

Tabel 10-1 Kostenraming bovenhoofd met woelkelder

Onderdeel	Volume beton (m ³)	Eenheidsprijs (€)	Totaal prijs (€)
Vloer	1524	225	342.900
Zijwanden	5924	225	1.332.900
Drempel en voorwand	928	450	417.600
Breekbalken	118	450	53.100
Pneumatisch afzinken	-	-	670.000
Totaal			2.816.500

De kosten blijken nauwelijks af te wijken van de oorspronkelijke raming (verschil is 1%).

Verlengde kolk

De kosten van de verlengde kolk zijn geraamd op 70% van de kosten van het nieuwe bovenhoofd. In de oorspronkelijke raming is dit $0,70 \cdot 6.127.000 = 4.289.000$ gulden.

Als gekeken wordt naar de hoeveelheden beton in de verlengde kolkmoet, wordt een vergelijkbaar bedrag gevonden:

Betondoorsnede van de kolkmoet = 222 m³

Lengte van de kolkmoet = 43 m

Volume beton = $222 \cdot 43 = 9.546$ m³

De kosten voor verlenging worden dan: $9546 \cdot 225 = € 2.147.850$

Dit is vergelijkbaar met de richtprijs van ruim 4 miljoen gulden (het verschil is 10%).

In bijlage H2 is de totale kostenraming van de civiele componenten opgenomen. Hier wordt volstaan met het vermelden van de totale kosten:

Totale kosten civieltechnische componenten: € 18.873.125

10.2.3 Raming staalbouwkundige componenten

De kostenraming van de staalbouwkundige componenten betreft onder andere de posten van de deuren, bovendraipunten en taatsen, aanslagen en kleine reparaties aan de deuren.

In bijlage H2 staan deze posten vermeld.

Totale kosten staalbouw: € 441.293

10.2.4 Raming werktuigbouwkundige componenten

Onder de benodigde werktuigbouwkundige componenten van de sluis vallen diverse, niet nader gespecificeerde posten als schuiven, bewegingswerken e.d. In bijlage H2 is de berekening van de kosten opgenomen.

Totale werktuigbouwkundige kosten: € 766.239

10.2.5 Raming installatietechnische componenten

Evenals de kosten van de werktuigbouwkundige componenten worden de posten van de installatietechniek niet apart gedefinieerd. Deze posten omvatten o.a. verlichting, seinen, camera's, kabels e.d., zie bijlage H2

Totale kosten installatietechniek: € 91.868

10.2.6 Totale raming bestaand ontwerp

De totale kostenraming voor het bestaande ontwerp van kolkverlenging is als volgt:

Civiele componenten: € 18.873.125

Staalbouwkundige componenten: € 441.293

Werktuigbouwkundige componenten: € 766.239

Installatietechnische componenten: € 91.868

Totaal: € 20.172.525

10.3 Opbrengst sluiscentrale

In hoofdstuk 8 is de opbrengst van de centrale berekend:

Uit schutten kan per jaar 855.000 kWh elektriciteit geproduceerd worden.

Uit spuien kan per jaar 8.375.000 kWh elektriciteit geproduceerd worden.

Voor het berekenen van de haalbaarheid worden nu twee gevallen onderscheiden:

Energiewinning uit alleen het schutten door de kolk: $E = 855.000 \text{ kWh/jaar}$

Energiewinning door zowel schutten als spuien: $E = 9.230.000 \text{ kWh/jaar (afgerond)}$

Verkoopprijs elektriciteit aan consument: € 0,16/kWh

De vergoeding voor de geleverde energie wordt op € 0,04/kWh geraamd. Dit is gelijk aan de kostprijs voor energie uit fossiele brandstoffen (zie bijlage A). De vergoeding komt op basis van onderhandelingen over leveringsvoorwaarden en tarieven tussen de producent en het energiedistributiebedrijf tot stand. In de gevoeligheidsanalyse zal het effect van variaties van deze vergoeding worden berekend.

De opbrengst van de centrale wordt voor beide gevallen:

In het eerste geval: $855.000 \text{ kWh} \cdot € 0,04/\text{kWh} = € 34.200 / \text{jaar}$

In het tweede geval: $9.230.000 \text{ kWh} \cdot € 0,04/\text{kWh} = € 369.200 / \text{jaar}$

10.4 Kostenraming sluiscentrale

10.4.1 Kosten van onderhoud en beheer

De jaarlijkse kosten van onderhoud en beheer worden op 25% van de jaarlijkse opbrengst geschat (Bron: ECOWATT) Deze kosten omvatten zowel de materiaalkosten (olie, vetten, vervanging van bepaalde onderdelen) als de personeelskosten.

De jaarlijkse kosten worden in geval van energiewinning uit schutten respectievelijk schutten en spuien:

$$0,25 \cdot 34.200 = 8.550 \text{ €/jaar}$$

$$0,25 \cdot 369.200 = 92.300 \text{ €/jaar}$$

10.4.2 Opbouw investeringskosten

De kostenraming van de sluiscentrale zal eveneens volgens de PRI-systematiek worden uitgevoerd. Bij deze raming wordt onderscheid gemaakt in de kosten voor de sluis en kosten voor de waterkrachtcentrale van de vier

disciplines. De extra kosten voor de centrale ten opzichte van de totale kosten kunnen op deze manier inzichtelijk worden gemaakt.

10.4.3 Raming componenten schutsluis

De kostenraming voor de componenten die aan de schutsluis toegeschreven kunnen worden, zijn voor alle disciplines (civiel, staal, werktuigbouw en installaties) hetzelfde als voor het bestaande ontwerp van kolkverlenging, zie paragraaf 10.2.6. Dit is in totaal € 20.172.525.

10.4.4 Raming civiele componenten van de centrale

Omdat de civiele componenten de betonconstructie van het bovenhoofd als geheel betreffen, is geen duidelijk onderscheid te maken tussen kosten voor de centrale en kosten voor de sluis.

De omvang van de kosten die aan de centrale zijn toe te schrijven zullen daarom bestaan uit het verschil tussen de totale civiele kosten voor het oorspronkelijk ontwerp en het ontwerp met sluiscentrale.

In tabel 10-2 zijn de totale civiele kosten van het bestaande ontwerp en het ontwerp voor de sluiscentrale opgenomen. De kostenraming van de gehele sluiscentrale staat in bijlage H3.

Tabel 10-2 Vergelijking investeringskosten civiele component

	Bestaand ontwerp	Ontwerp sluiscentrale
Totale kosten	18.873.125	17.587.515
Verschil	1.285.610	

De kosten voor de civiele componenten van de sluiscentrale vallen dus lager uit dan voor het oorspronkelijk ontwerp. De investeringskosten voor de civiele componenten van de sluiscentrale zijn dus negatief: € - 1.285.610.

10.4.5 Raming staalbouw componenten centrale

De directe kosten voor de staalbouwcomponenten van de centrale zijn als volgt:

Trappen, kranen en rails:	€ 30.000
Rioolbuizen:	€ 140.000
Visrekken:	€ 10.000
Totaal directe kosten	€ 180.000
Totale kosten:	€ 339.293

10.4.6 Raming werktuigbouwkundige componenten centrale

De directe werktuigbouwkundige kosten voor de centrale zijn:

Turbine en generator:	€ 2.800.000
Schuiven:	€ 70.000
Bewegingswerk schuiven:	€ 70.000
Totaal directe kosten:	€ 2.940.000
Totale kosten:	€ 5.403.238

10.4.7 Raming installatietechnische componenten centrale

De directe installatietechnische kosten voor de centrale zijn:

Schakelkast en transformatoren	€ 25.000
Leidingen, hoogspanningskabels	€ 10.000
Bedieningspanelen:	€ 20.000
Beveiligingsinstallatie:	€ 15.000
Totaal directe kosten:	€ 70.000
Totale kosten:	€ 100.793

10.4.8 Raming totale kosten sluiscentrale

De totale kosten voor de centrale zijn als volgt geraamd:

Civiele componenten, deel sluis	€ 18.873.125
Civiele componenten, deel centrale	€ 1.285.610 -
Subtotaal:	€ 17.587.515
Staalbouwkundige componenten, deel sluis	€ 441.293
Staalbouwkundige componenten, deel centrale	€ 339.293

Subtotaal:	€ 780.586
Werktuigbouwkundige componenten, deel sluis	€ 766.239
Werktuigbouwkundige componenten, deel centrale	€ 5.403.238
Subtotaal:	€ 6.169.477
Installatietechnische componenten, deel sluis	€ 91.868
Installatietechnische componenten, deel centrale	€ 100.793
Subtotaal:	€ 192.661
Totale kosten sluiscentrale:	€ 24.730.239
Totale kosten bestaand ontwerp:	€ 20.172.525
Verschil:	€ 4.557.714

De centrale kost dus ruim vier miljoen euro meer dan het verlengen van de kolk met een bovenhoofd met woelkelder, zie tabel 10-3.

Tabel 10-3 Kostenvergelijking bestaand ontwerp en ontwerp met sluiscentrale

Discipline	CT	Staalbouw	Werktuigbouw	Installaties	Totaal
Bestaand ontwerp	18.873.125	441.293	766.239	91.868	20.172.525
Deel sluis	18.873.125	441.293	766.239	91.868	20.172.525
Deel centrale	-1.285.610	339.293	5.403.238	100.793	4.557.714
Totaal sluiscentrale	17.587.515	780.586	6.169.477	192.661	24.730.239

10.5 De haalbaarheid van de centrale

Met de berekende opbrengsten en de kosten van de centrale kan nu de haalbaarheid bepaald worden. Er worden twee gevallen onderscheiden:

- Het terugverdienen van de investeringen voor de centrale door energiewinning uit alleen schutten
- Het terugverdienen van de investeringen voor de centrale door energiewinning uit schutten en spuien

Voor deze gevallen zal allereerst de eenvoudige terugverdientijd (simple payback period, SPP) berekend worden, dus zonder rentepercentage. Deze berekening geeft inzicht in de haalbaarheid van deze vier alternatieven.

Op deze berekening zijn de volgende kosten en opbrengsten van toepassing:

I_{centrale} :	€ 4.557.714
$R\text{-}o\&b_{\text{schutten}}$:	€ 34.200 - € 8.550 = € 25.650 / jaar
$R\text{-}o\&b_{\text{schutten en spuien}}$:	€ 369.200 - € 92.300 = € 276.900 / jaar

De simple payback period voor de genoemde gevallen staat in tabel 10-4 gegeven.

Tabel 10-4 Terugverdientijden voor verschillende investeringen en opbrengsten

n (jaren)	$R\text{-}o\&b_{\text{schutten}}$	$R\text{-}o\&b_{\text{schutten en spuien}}$
I_{centrale}	178	16

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de investeringskosten alleen terugverdiend kunnen worden als zowel tijdens het schutten als door spuien energie wordt gewonnen. Dit zal in het nu volgende deel nader worden geanalyseerd.

Indien wel rekening gehouden wordt met de rente, is de terugbetaalperiode langer. In tabel 10-5 staan voor diverse rentepercentages de terugbetaalperioden gegeven. Dit betekent dat de netto contante waarde aan het einde van de berekende terugbetaalperiode nul is.

Tabel 10-5 Terugbetaalperioden sluiscentrale

	2%	3%	4%	5%	6%
Terugbetaalperiode (jaren)	20	23	27	36	75

Evenzo kan het projectresultaat, de netto contante waarde na een bepaald aantal jaren bij een bepaalde rente, berekend worden. In tabel 10-6 is dit resultaat gegeven voor verschillende waarden van n (economische levensduur) en rentestand.

Tabel 10-6 Netto contante waarde als functie van rentestand en economische levensduur

n (jaren) / r (%)	2	3	4	5	6
5	-3.252.557	-3.289.593	-3.325.004	-3.358.882	-3.391.310
10	-2.070.436	-2.195.701	-2.311.807	-2.419.566	-2.519.706
15	-999.753	-1.252.100	-1.479.033	-1.683.587	-1.868.392
20	-30.002	-438.141	-794.553	-1.106.928	-1.381.693
25	848.331	263.987	-231.960	-655.101	-1.018.003
30	1.643.865	869.648	230.450	-301.082	-746.232
35	2.364.404	1.392.097	610.517	-23.700	-543.150
40	3.017.018	1.842.766	922.905	193.637	-391.394
45	3.608.111	2.231.518	1.179.665	363.926	-277.994
50	4.143.482	2.566.858	1.390.703	497.352	-193.255

(bedragen in euro's)

Als laatste kan de interne rentevoet (IRR) berekend worden, zie paragraaf 10.1. Dit is het rentepercentage waarbij aan het einde van een bepaalde economische levensduur het projectresultaat 0 is. Voor een economische levensduur van 40 jaar is de IRR = 5,3%.

Uit deze cijfers blijkt dat de centrale rendabel zal kunnen draaien. Dit is te danken aan de lage investeringskosten, welke grotendeels aan de kolkverlenging toegeschreven kunnen worden.

Overige kentallen:

Investeringskosten/kW geïnstalleerd vermogen: € 506

Investeringskosten/kWh geproduceerde energie (per jaar): € 0,50

Als de economische levensduur 40 jaar is, zal het projectresultaat positief zijn als de rente lager is dan 5,3%. Dit betekent dat ook een deel van de investeringen voor de kolkverlenging (I_{sluis}) terugverdiend kunnen worden. In tabel 10-7 is dit voor diverse rentepercentages berekend.

Tabel 10-7 Projectresultaat sluiscentrale

	r (%)	2	3	4	5
$\Sigma (R-o\&b)$	€	175.063.390	155.850.655	139.884.523	126.492.980
I_{sluis}	€	4.557.714	4.557.714	4.557.714	4.557.714
NCW	€	3.017.018	1.842.766	922.905	193.637
NCW/I_{sluis}	%	15	9	5	1

Opm: NCW/I_{sluis} = projectresultaat na aftrek van de investeringskosten voor de centrale, gedeeld door de investeringskosten voor de sluis (20.172.525)

De opbrengst van de centrale is dus zodanig, dat een klein deel (minder dan 15%) van de investeringskosten van de sluis terugverdiend kan worden.

10.6 Gevoeligheidsanalyse

In de voorgaande paragraaf is de haalbaarheid aangetoond op basis van een maximaal toelaatbaar debiet op het kanaal van 75 m³/s, waarvan 65 m³/s voor de centrale gebruikt kan worden.

De haalbaarheidsstudie van NOVEM gaat uit van maximaal 45 m³/s voor de centrale. In het navolgende wordt de haalbaarheid van de centrale bepaald op basis van energiewinning uit zowel schutten als spuien (45 m³/s) met als doel het terugverdienen van de investeringskosten voor de centrale.

Opbrengst schutten: 855.000 kWh * € 0,04/kWh = € 34.200

Opbrengst spuien: 6.437.000 kWh * € 0,04/kWh = € 257.480

Totale opbrengst R: € 291.680

Kosten onderhoud en beheer o&b: 0,25*291.680 = € 72.920

De eenvoudige terugverdientijd (dus zonder rente) wordt nu:

$$SPP = \frac{4.557.714}{291.680 - 72.920} = 21 \text{ jaar}$$

In tabel 10-8 is de haalbaarheid van de sluiscentrale bij beide ontwerpdebieten (45 m³/s en 65 m³/s) vergeleken voor diverse rentepercentages bij een economische levensduur van 40 jaar. Uit de tabel volgt dat de terugverdientijd van de centrale aanzienlijk langer is als er maximaal 45 m³/s door de centrale gevoerd kan worden. In dat geval zal de NCW alleen positief zijn (bij een economische levensduur van 40 jaar) als de rente lager is dan 4%.

Tabel 10-8 Vergelijking haalbaarheid centrales

Aspect	Ontwerp-debiet (m ³ /s)	2%	3%	4%	5%
Terugverdientijd (jaren)	45	27,2	33,2	45,7	niet mog.
	65	20,2	23,0	27,4	35,5
NCW (€)	45	1.426.571	498.874	-227.847	-803.992
	65	3.017.018	1.842.766	922.905	193.637

Ook de variaties in de inkomsten als gevolg van lagere of hogere vergoedingen voor de geleverde energie kunnen berekend worden: in tabel 10-9 staat voor een economische levensduur van 40 jaar de netto contante waarde van de centrale als functie van rentepercentage en vergoeding voor de geleverde energie.

Tabel 10-9 Projectresultaat als functie van rentestand en energievergoeding

Vergoeding per kWh (€)	2%	3%	4%	5%
0,03	1.123.335	242.646	-447.250	-994.201
0,04	3.017.018	1.842.766	922.905	193.637
0,05	4.910.701	3.442.886	2.293.060	1.381.475
0,06	6.804.384	5.043.007	3.663.215	2.569.313
0,07	8.698.067	6.643.127	5.033.369	3.757.150

0,08	10.591.750	8.243.247	6.403.524	4.944.988
------	------------	-----------	-----------	-----------

Als de vergoeding lager is dan 0,03 euro per kWh zal, afhankelijk van het rentepercentage een negatieve netto contante waarde ontstaan. De vergoeding voor de levering van duurzame energie is volgens het Informatiecentrum Duurzame Energie gemiddeld € 0,07/kWh. De centrale zal dan dus zeker rendabel zijn.

10.7 Conclusies

In dit hoofdstuk is de economische haalbaarheid van de sluiscentrale geanalyseerd.

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Investeringskosten voor de centrale blijven beperkt omdat de civiele kosten volledig aan de sluis toegeschreven kunnen worden. Er is zelfs sprake van negatieve investeringskosten voor de civiele componenten van de centrale.
- De energieproductie uit het schutproces is te klein om een positieve netto contante waarde te behalen. Om de centrale winstgevend te maken, is het daarom noodzakelijk om ook door de sluis te spuien voor energiewinning.
- Indien zowel energie gewonnen wordt uit schutten als uit spuien door de kolk kunnen de investeringen voor de centrale en een klein deel van de investeringen voor de kolkverlenging worden terugverdiend.
- De energiewinning uit het spuiproces levert het grootste deel van de opbrengst (meer dan 90%).
- In vergelijking met de referentieprojecten zijn de resultaten van Maasbracht zeer goed.
- De geproduceerde energie is duurzaam, waardoor fossiele brandstoffen uitgespaard worden. De uitstoot van CO₂ gassen wordt zo verminderd.

10.8 Literatuur

- {10.1} *Hydro-electric Generating Station Built within a Canal Lock System*. Technical brochure No. 81. CADDET Renewable Energy, 1998.
- {10.2} Ridder, H.A.J. de, *Integraal ontwerpen*. TUDelft: collegedictaat CT3060, mei 2000.
- {10.3} *Van voedingsgracht tot groene kracht*. Waterspiegel, infomagazine van het Departement Leefmilieu en Infrastructuur, nummer 6, 2000.
- {10.4} Eindrapport complex Maasbracht, project Zandmaas/peilopzet. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, januari 2000.

11 Conclusies en aanbevelingen

In het tweede hoofdstuk van dit rapport is de doelstelling van het afstudeeronderzoek gepresenteerd in de vorm van een aantal onderzoeksvragen. Deze vragen worden in dit hoofdstuk beantwoord, gevolgd door een aantal conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.

11.1 Conclusies

De vier onderzoeksvragen uit de probleemanalyse worden hier herhaald:

- 1 Waar kan in Nederland energie gewonnen worden uit het verval over schutsluizen en spuisluizen?
- 2 Hoe kan het verval over een schutsluis of spuisluis gebruikt worden voor energiewinning?
- 3 Hoe ziet het ontwerp voor zo'n sluiscentrale er uit?
- 4 Is de aanleg van zo'n centrale economisch haalbaar, m.a.w.: worden de investeringskosten binnen afzienbare tijd terugverdiend door de verkoop van energie?

Op basis van dit onderzoek worden de volgende conclusies getrokken, welke antwoord geven op de onderzoeksvragen:

- In principe kan bij elke schutsluis en spuisluis in Nederland energie gewonnen worden. Maasbracht heeft van de onderzochte locaties het grootste potentieel voor energiewinning uit schutsluizen. Dit is tevens het sluizencomplex met het grootste verval van Nederland.
- De functionele inpassing van een waterkrachtcentrale in een schutsluis valt uiteen in twee delen: energiewinning tijdens het schutten en energiewinning tijdens het spuien. De opbrengst van de centrale wordt hoofdzakelijk geleverd in de spuifase.
- Met betrekking tot de ruimtelijke inpassing van de centrale in de sluis bieden sluizen met grote vervallen door de omvang van de benodigde civiele constructies (bovenhoofd en benedenhoofd) de meeste mogelijkheden. Bij sluizen met kleine vervallen wordt de kolk doorgaans door openingen in de deuren gevuld. Dit biedt weinig mogelijkheden tot het aanpassen van het vul/ledigsysteem voor energiewinning.
- Wat betreft de functionele inpassing van de centrale wordt onderscheid gemaakt in energiewinning tijdens schutten en tijdens spuien door de kolk. De energieproductie uit het schutten vertoont pieken met een kleine tijdschaal (orde van grootte: minuten). De energieproductie door spuien is gedurende langere tijd constant, orde van grootte: uren.
- Energiewinning is mogelijk door het plaatsen van een centrale in het vul/ledigsysteem van de sluis. Indien voldoende ruimte beschikbaar is, heeft het plaatsen van de centrale in een overstroombare drempel vóór de kolk wat betreft de ruimtelijke inpassing van de centrale in de sluis de voorkeur boven een gesplitste centrale of een blokcentrale aan één kant van de sluis. Dit ontwerp zal ook het hoogste hydraulische rendement hebben.
- Een turbine wordt ontworpen op een bepaald, veel voorkomend verval en debiet. In dit ontwerp punt is het rendement maximaal, buiten het ontwerp punt neemt het rendement af. Door het installeren van dubbel gereguleerde turbines blijft het rendement van de turbine ook buiten dit ontwerp punt vrij hoog.
- Het verloop van vuldebet kan worden beïnvloed door het getrapte openen van de riolen. Het debiet kan op die manier zo lang mogelijk constant gehouden worden, wat een positief effect heeft op het turbinerendement.
- Omdat de riolen een groot deel van de vultijd gedeeltelijk geopend zijn, is de hydraulische verliescoëfficiënt bij de schuif hoog, wat een laag hydraulisch rendement als gevolg heeft. Het totale rendement van de centrale is hierdoor het grootste deel van de vultijd niet hoger dan 50%. Dit komt ook tot uiting in de zeer lage belastingsfactor en capaciteitsfactor van de centrale.
- Als de centrale in nieuw te bouwen, te renoveren of uit te breiden sluizen wordt geïntegreerd, kunnen de kosten voor de centrale beperkt blijven. Een groot deel van de kosten, waaronder de kosten van de civiele constructie, kunnen toegeschreven worden aan de sluisconstructie. Uitsluitend de meerkosten worden aan de centrale toegewezen waardoor de investeringskosten voor de centrale zeer laag zijn.
- De capaciteit van de centrale wordt slechts ten dele benut: tijdens het schutten wordt 23% van het geïnstalleerde vermogen gebruikt, tijdens de spuifase is dat 77%.
- De belastingsfactor van de centrale is eveneens laag: gemiddeld 15%.
- In het geval van Maasbracht wordt ruim 90% van de energieproductie geleverd in de spuifase. Bij de beoordeling van de haalbaarheid van energiewinning uit het schutten door een kolk zijn dus niet alleen de

investeringen laag, maar de opbrengst eveneens. Op basis van de hoeveelheid geproduceerde energie uit het nivelleren van de kolk kunnen de investeringskosten van de centrale niet binnen de economische levensduur van 30 jaar worden terugverdiend. Als er op een bepaalde locatie geen spui mogelijkheid aanwezig is, is het concept van de sluiscentrale dus niet haalbaar.

- In de inleiding is het streven van de overheid met betrekking tot energiewinning uit waterkracht gepresenteerd: de jaarlijkse energieproductie moet met 700 GWh per jaar toenemen. Met een jaarproductie van ruim 9 GWh is de bijdrage van de sluiscentrale te Maasbracht aan deze doelstelling te verwaarlozen. Het sluiscentrale concept is dus niet de manier om aan de vraag naar energie uit waterkracht te voldoen.
- In de sluiscentrale wordt energie geproduceerd op een 'groene', duurzame manier. Hoewel niet aan de totale vraag naar energie uit waterkracht voldaan kan worden, levert de sluiscentrale wel een bijdrage aan de, in het Kyoto-protocol vereiste reductie van de uitstoot van broeikasgassen. Er is dus sprake van baten voor het milieu.

11.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van dit onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden:

- Als in Maasbracht een centrale wordt opgenomen in de verlengde kolk, dan moet dit in Born eveneens gedaan worden. Het aangevoerde water in de spuifase moet immers ook het complex bij Born passeren. Het verval in Born is niet veel kleiner dan in Maasbracht, zodat vergelijkbare resultaten gehaald kunnen worden.
- Voor de scheepvaart en het beperken van schutverliezen is het beter om de centrale in de westkolk te integreren. Deze kolk ligt verder uit de as van het Julianakanaal en is door middel van remmingwerken en een breed sluiseland gescheiden van de andere twee kolken. Vooral in de spuifase is dit een voordeel in verband met de grote stroomsnelheden die achter de sluis ontstaan als gevolg van het spuidebiet. Een tweede voordeel is dat het waterspaarsysteem onveranderd blijft. Het waterverlies zal dan niet groter worden.
- Het turbineonderwerp verdient nader onderzoek: dit betreft zowel onderzoek naar het mogelijk optreden van cavitatie en de vereiste diepteligging om dit te voorkomen als een nauwkeurige bepaling van het rendement als functie van het debiet dat door de turbine wordt gevoerd.
- Er zal modelonderzoek uitgevoerd moeten worden om de krachten op de schepen in de kolk te bepalen. Als deze krachten te groot blijken moet het ontwerp worden aangepast. In deze opstelling kan ook het hydraulisch rendement van het ontwerp nauwkeuriger worden onderzocht.
- De effecten van de kolkverlenging op de verdeling van de scheepvaart en het aantal schuttingen per jaar door de verlengde kolk moeten onderzocht worden. Aan de hand van zo'n onderzoek kan een betere berekening gemaakt worden van de opbrengst van de centrale door het schutproces.
- Voor de bepaling van zowel de kosten als de opbrengst van de centrale moet een probabilistische berekening uitgevoerd worden, omdat zowel in de gemaakte kostenraming als opbrengstenberekening een grote spreiding zit. In deze benadering kan dan ook het effect van prijsvariaties (zowel kosten als inkomsten) worden verdisconteerd.
- Teneinde een vloeiend verloop van het vuldebiet te krijgen, kan het hefprogramma van de schuiven verder worden aangepast
- Omdat het grootste deel van de energieopbrengst door het spuien tot stand komt, is het aan te bevelen om de haalbaarheid van de sluiscentrale nader te onderzoeken bij schutsluizen die direct in een rivier gelegen zijn. Hier is immers altijd een waterafvoerende functie aanwezig.

Literatuur

Arends, G.J., *Sluizen en gemalen in het Noordzeekanaal: anderhalve eeuw ontwerpen, bouwen en vernieuwen*. Utrecht: Uitgeverij Matrijs, 2001.

Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica, collegehandleiding*. Delft: TUDelft, collegedictaat CT2100, maart 1999.

Bezuyen, K.G., *Constructieve waterbouwkunde, deel B: schutsluizen*. Delft: TUDelft, collegedictaat Ctw3330, februari 1999.

Derde Energienota. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken, 1995.

Duivendijk, J. van., *Energiewaterbouwkunde*. Delft: TUDelft, collegedictaat CT5304, maart 2002.

Eindrapport complex Maasbracht, project Zandmaas/peilopzet. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, januari 2000.

Fraenkel, P., *Micro-hydro power- a guide for development workers*. London: Intermediate Technology Publications Ltd., 1991.

Grootschalige waterkracht in Nederland, openbaar eindrapport Nederlandse Onderneming Voor Energie en Milieu (NOVEM). Delft: Adviesbureau Stroom-Lijn, 1996.

Gulliver, J.S., *Hydropower engineering handbook*. New York: McGraw-Hill, 1991.

Handleiding LOCKFILL. Delft: Waterloopkundig laboratorium, november 1994.

Hydro-electric Generating Station Built within a Canal Lock System. Technical brochure No. 81. CADDET Renewable Energy, 1998.

Jadoenathmisier, G.A., *Waterkracht uit het Julianakanaal*. Delft: afstudeerrapport TUDelft, 1985.

Low-head 11 MW Hydro Plant in the Netherlands. Technical brochure No. 19. CADDET Renewable Energy, 1995.

Mosonyi, E., *Water Power Development, volume one: low-head power plants*. Budapest: Akadémiai Kiadó, publishing house of the Hungarian Academy of Sciences, 1963.

Newmills Hydro, Waterturbines. Brochure

Ontwerp van schutsluizen deel 1. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, juni 2000.

Ontwerp van schutsluizen deel 2. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, juni 2000.

Penche, C., *Layman's guidebook on how to develop a small hydro site*. Brussel: European Small Hydropower Association (ESHA), juni 1998.

Pomp Accumulatie Centrale Brouwerdam en IJsselmeer, deelrapportage pompturbines. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, directie Bruggen.

Prijzenboekje, 21^e editie. Leidschendam: Dace, december 2000.

Richtlijnen vaarwegen. Commissie Vaarwegbeheerders (CVB) Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.: september 1999.

Ridder, H.A.J. de, *Integraal ontwerpen*. TUDelft: collegedictaat CT3060, mei 2000.

Schweiger, F. en Gregori, I., *Comparison of turbine parameters for small and large axial units*. In: Water power and dam construction, november 1992.

Thijssse, J.Th., *Hydraulica*. Overdruk uit de Technische Vraagbaak 1951.

Trajectnota/MER Zeepoort IJmond, achtergronddocument alternatieven en varianten. Haarlem: Rijkswaterstaat directie Noord-Holland, oktober 2001.

Van voedingsgracht tot groene kracht. Waterspiegel, infomagazine van het Departement Leefmilieu en Infrastructuur, nummer 6, 2000.

Vervanging sluizen 10 t/m 13 Zuid-Willemsvaart, voorontwerpnota sluis 11 en 13. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat, oktober 1999.

Vullen en ledigen van een schutkolk via een riool met schuif – Handleiding VLKOLK. Delft: Waterloopkundig laboratorium, december 1982.

Zandmaas/Maasroute Ontwerp Tracé Besluit - scheepvaart en kunstwerken. Maastricht: Rijkswaterstaat, april 2001.

Zanten, W. van, 'Hydro power in the Netherlands'. *CADDET Renewable Energy Newsletter*, 2001.

Internetpagina's:

www.pde.nl

www.microhydropower.net

www.duurzame-energie.nl/de/waterkracht.php

<http://www.microhydro.com/>

www.rws-avv.nl/vin.htm
