Annex report
Tidal Energy

Deltares

12 November 2009
Final Report
9V1913.A0

A COMPANY OF

ROYAL HASKONING

HASKONING NEDERLAND B.V.
COASTAL & RIVERS

George Hintzenweg 85
Postbus 8520
3009 AM Rotterdam
+31 (0)10 443 36 66 Telefoon
+31 (0)10 443 36 88 Fax
info@rotterdam.royalhaskoning.com E-mail
www.royalhaskoning.com Internet
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel	Annex report Tidal energy
Verkorte documenttitel	Annex Tidal energy
Status	Final report
Datum	12 November 2009
Projectnaam	Tidal Energy
Projectnummer	9V1913.A0
Opdrachtgever	Deltares
Referentie	9V1913.A0/R0004/CVH/ILAN/Rott

Auteur(s)	Cathelijne van Haselen, Joost Lansen, Nick Cooper, Martin Bailey
Collegiale toets	Leslie Mooyaart
Datum/paraaf	16 november 2009 ……
Vrijgegeven door	Cathelijne van Haselen
Datum/paraaf	16 november 2009 ……

INHOUDSOPGAVE

			Blz.
1	ANNEX A: DETAILS OF SELECTED UK CASE STUDIES		1
	1.1	Mersey Barrage	1
	1.2	Severn Barrage	1
	1.3	Swansea	2
	1.4	Russell	2
	1.5	Liverpool	2
	1.6	Loughor	3
	1.7	Duddon	3
	1.8	Wyre	4
2	ANNEX B: CASE STUDY SUMMARY – POTENTIAL ENVIRONMENTAL ISSUES AND EFFECTS		5
	2.1	Severn Estuary	5
	2.2	Mersey Estuary	6
	2.3	Tidal lagoon in Liverpool Bay	8
	2.4	Russell lagoons (Severn estuary)	10
	2.5	Swansea Bay lagoon (Severn estuary)	13
3	ANNEX C: INFORMATION FROM THE NETHERLANDS		17
	3.1	Oosterschelde Kering (Drie Maandelijks Bericht Deltawerken, nr.80).	17
	3.2	Een getijcentrale in de Oosterschelde	19
	3.3	PAO Course Energy Hydraulic Engineering	28
	3.4	Tidal stream potential	33
	3.4.1	Eastern Scheldt	33
	3.4.2	Afsluitdijk	34
	3.4.3	Waddenzee	37
4	ANNEX D: RESULTS FROM THE INTERVIEWS		39
	4.1	Interview with Roger Morris	39
	4.2	Interview with Professor Falconer	42
5	ANNEX E: RESULTATEN VAN DE BIJEENKOMST GETIJDE ENERGIE		47
	5.1	Agenda Bijeenkomst Getijde Energie	47
	5.2	Deelnemers	47
	5.3	Presentaties	49
	5.4	Workshop resultaten lessons learnt	53
	5.4.1	Algemeen	53
	5.4.2	Economische aspecten en commerciële haalbaarheid	54
	5.4.3	Andere economische aspecten	54
	5.4.4	Milieu	54
	5.4.5	Discussie	54
	5.4.6	Resultaten groepsessie	55
	5.4.7	Discussie	61
6	ANNEX F: DETERMINATION OF ECONOMIC ENERGY AND POWER		62
	6.1	Symbols	62
	6.2	Introduction	62
	6.3	Method	62
	6.4	Dams without run-off	63

6.5 Polders 66
6.6 Dams with run-off 68
6.7 Conclusions 70

1 ANNEX A: DETAILS OF SELECTED UK CASE STUDIES

1.1 Mersey Barrage

Table A.1. – Details of selected UK case studies: Mersey, Severn, Swansea, Russell, Liverpool, Loughor, Duddon and Wyre.

Mersey Barrage	**£M**
Temporary works	165.6
Caisson construction	178.4
Rock blanket and scour protection	50.9
Other	9.8
Accommodation works	98.7
Reclamation embankment	31.3
Lock	139.3
Turbines, gearboxes, generators	360.4
Sluice gates, stop logs, fish pass	69.8
M&E	87.4
Switch gear	20.6
Cables and transmission	125.3
Environmental studies, consent etc	32.0
Detailed design	53.6
Management	88.5
Total capital cost	**1,511.6**
O&M (annual)	20.5

1.2 Severn Barrage

Table A.2. – Details of selected UK case studies: Severn.

	Cardiff-Weston		**Shoots**
Severn Barrage	**£M**		**£M**
Studies, planning, environmental studies, compensatory works	1,054.0		115.2
Caissons fabrication and installation	4,538.0		441.8
Embankments and armour	863.0		90.1
Gates	957.0		85.2
Civil Works (other)			43.9
M&E	6,130.0		470.9
Design and Supervision	470.3		73.1
Contingency	1,054.0		173.6
Total capital cost	**15,066.3**		**1,493.8**

O&M (annual)	115.0		24.5
NB: 2006 prices			

1.3 Swansea

Table A.3. – Details of selected UK case studies: Swansea.

Swansea Bay Lagoon	**Tidal Electric Ltd**		**Independent Review**
	£M		**£M**
Embankment	48.5		114.0
Powerhouse	11.6		42.0
Turbine plant and equipment	14.1		33.0
Connection to network	3.7		3.7
Environmental studies, design, consent, construction supervision, etc	2.5		10.1
Contingency	1.2		52.3
Total capital cost	**81.5**		**255.1**

1.4 Russell

Table A.4. – Details of selected UK case studies: Russell.

Russell Lagoons (Lagoon 1 only)	**£M**
Caisson	640
Embankment	622
Turbines and generators	362
Transmission (connection)	123
Environmental studies, consents, etc	347
Site engineering management costs	129
Contingency (civil)	125
Total capital cost	**2,348**
3 No. lagoons have been assumed to cost 3 x Lagoon 1	7,044

1.5 Liverpool

Table A.5. – Details of selected UK case studies: Liverpool.

Liverpool Bay Lagoon	**£M**
Caisson construction (power house)	1.6
Embankment	444.4 *
Turbine generators	86.7
Construction labour	11.9
Cable connection to 275kV GSP	75.6
Project management, feasibility, planning and approval	43.4
Total capital cost	**663.6**

* Incl. dredging, rock armour, quarry run (waste rock), road transport, placement and geomembrane bags

1.6 Loughor

Table A.6. – Details of selected UK case studies: Loughor.

Loughor Barrage	**£M**
In situ construction	8.9
Cofferdams (sheet pile)	4.2
Turbines, gearboxes, generators	2.6
Sluice gates, stop logs, fish pass	2.3
M&E	1.3
Environmental studies, consent etc	4.1
Total capital cost	**23.4**
O&M (annual)	0.2

1.7 Duddon

Table A.7. – Details of selected UK case studies: Duddon.

Duddon Barrage	**£M**
Caisson construction	134.4
Rock blanket and scour protection	0.5
Grouting	2.3
Caisson tow	2.3
Caisson installation	7.5
Other works	0.6
Foundation preparation	5.3
Dredging	14.2
Containment bunds	6.0
Sandfill	5.6
Slope protection	46.7
In situ construction (lock)	1.4
Gates etc	0.8
Jetties	2.1
Bridge	2.6
Highway	15.6
Access	5.1
Turbines, gearboxes, generators	86.1
Sluice gates, stop logs, fish pass	22.1
M&E	23.7
Switch gear	6.2
Cables and transmission	22.6
Total capital cost	**413.5**
O&M (annual)	2.6

1.8 Wyre

Table A.8. – Details of selected UK case studies: Wyre.

Wyre Barrage	**£M**
Caisson construction	21.5
Rock blanket and scour protection	2.3
Grouting	1.0
Fish screens	0.6
Caisson tow	0.8
Caisson installation	0.8
Other works	1.4
Dredging	12.3
Cofferdams (sheet pile)	3.1
Reclamation embankment	7.7
In situ construction (lock)	5.9
Gates etc	2.4
Jetties	0.4
Bridge	0.7
Access	1.5
Landscaping	0.5
Turbines, gearboxes, generators	34.5
Sluice gates, stop logs, fish pass	7.8
M&E	7.7
Cables and transmission	3.5
Land drainage	3.1
Buildings	1.8
Environmental studies, consent etc	16.8
Total capital cost	**138.0**
O&M (annual)	1.1

2 ANNEX B: CASE STUDY SUMMARY – POTENTIAL ENVIRONMENTAL ISSUES AND EFFECTS

2.1 Severn Estuary

Table B.1. – Summary of key environmental sensitivities and constraints of a tidal barrage on the Severn Estuary. (Adapted from Sustainable Development Commission (2007c)).

Feature	Summary	Potentially adverse factors
Marine Ecology	Reduced intertidal areas and reduced inundation and extent of saltmarsh resulting in loss of functionality. Reduction in extent of *Sabellaria alveolata* reef. Implications for distribution and extent of fauna and flora as a result of changes in sediment erosion and deposition patterns, salinity, turbidity and water exchange (flushing) Changes in the primary productivity (planktonic and epibenthic) due to changes in the light climate, water depth and bed shear stresses. Effects on spread of non-native marine species	Habitat loss. Loss of biodiversity. Changes productivity and water quality.
Ornithology	Disturbance to birds during construction. Displacement of birds. Changes to or loss of intertidal habitat available for birds. Changes to saltmarsh habitat extent affecting breeding waders, waterbirds and Section 41/ 42 (NERC, 2006) wintering passerines. Changes to freshwater wetlands for birds	Disturbance to birds during sensitive periods e.g. breeding or overwinter. Habitat loss for feeding, roosting and breeding.
Migratory and Estuarine Fish	Potential loss of genetic diversity and/ or local species extinction. Alterations to migratory cues for fish. Disruption to movements including turbine injury and mortality and complete loss of certain or all stock. Habitat changes or loss for feeding and nursery areas, or movements. Water quality effects on fish movements and survival.	Potential loss of priority protected species. Adverse changes to fish behaviour and breeding success.
Marine Water Quality	Change in concentrations of contaminants in estuary water/ sediments. Changes to estuary salinity regime and stratification.	Changes in primary productivity and potential for eutrophication effects.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	Changes to estuary water flushing characteristics and light attenuation. Changes in suspended sediment levels.	
Freshwater Environment and Associated Interfaces	Altered water quality. Altered groundwater regimes. Changes to Geological and Geomorphological SSSIs.	Changes in primary productivity and potential for eutrophication effects.
Noise & Vibration	Construction phase noise affecting wildlife behaviour. Operation phase noise affecting wildlife.	Disturbance or displacement during construction and operation.
Carbon Footprinting	Raw material supply and component manufacture. Transportation during construction and installation. Operational dredging, and pumping. Decommissioning.	Changes to greenhouse gas emissions.
Other Sea Uses	Changes to sediment characteristics in aggregate dredging areas. Change to dilution and dispersion of water discharges and disposals. Change to the hydraulic function of marine outfalls.	Affects upon water quality, productivity and Eutrophication.

2.2 Mersey Estuary

Table B.2. – Summary of key environmental sensitivities and constraints of a tidal barrage (or barrier) on the Mersey Estuary. (Adapted from Sustainable Development Commission (2007a)).

Feature	Summary	Potential adverse factors
Seabed sediments and transport processes	Large area of intertidal sand and mud banks in outer estuary through which navigation channels are maintained by dredging between the training banks (Environment Agency (2005)). The Mersey estuary is highly dynamic in its upper and middle reaches in terms of channel movement and sediment transport. Maintenance of navigation may have resulted in considerable changes in sediment deposition patterns in the middle estuary	Physical disruption to tidal flows may affect sediment transport and alter the estuary profile.
Hydrology	Mean spring tidal range of 8 -10m (Dept. for Trade and Industry (2004)) with maximum tidal current velocities of ca. 2.2m/s in the Narrows.	Disruption of tidal flows, levels of vertical mixing and light penetration, salinity.

Feature	Summary	Potential adverse factors
	The strong tidal currents weaken upstream as the estuary widens, leading to deposition of sand and mud which form extensive banks at low tide. Tidal currents dominate but density currents (especially in the Narrows) also important in moving bed material into the estuary. Mean annual significant wave height of <0.6m at estuary mouth (Dept. for Trade and Industry (2004)).	Alteration of tidal prism. Change in level of wave exposure.
Landscape/ seascape	The landscape is estuarine in character with intertidal mud/ sand flats and low exposed cliffs. The urban growth and built-up landscape of Liverpool is dominant on the north of the Mersey Estuary extending to the Wirral Peninsula and Birkenhead in the south. It is commercial/ industrial although semirural residential areas also exist on the coast and upstream beyond the upper estuary.	Visual intrusion. Habitat loss. Increased coastal traffic. Change to landscape character.
Coastal habitats	Priority coastal habitats listed on relevant Local Biodiversity Action Plans (LBAPs) of North Merseyside and Cheshire include coastal saltmarsh, sand dunes, and coastal and floodplain grazing marsh.	Habitat change due to changes in wave exposure. Loss of natural flood protection value of saltmarsh and mudflats of upper estuary.
Intertidal and subtidal habitats and communities	Greatest abundance and diversity of species found on the mobile sandbanks of the outer estuary and mudflats of the middle and upper estuary. Low diversity of species in the Narrows, where tidal streams are strong, and from the mobile sandflats of the middle estuary. Mudflats listed as a priority habitat on the Cheshire LBAP. Physical characteristics of the sediment, salinity and tidal flow, rather than pollution appear to be the major determinants of communities (Langston et al. (2006)).	Physical disturbance. Habitat loss. Habitat change due to changes in wave exposure.
Fish and shellfish	Fish community historically impoverished, but since improvements in water quality, estuary now hosts a wide range of fish species (Langston et al. (2006)). Over 40 fish species officially recorded as being currently present in the estuary (Jones (2006)).	Physical disturbance, particularly to fish migration. Electromagnetic field (EMF) disturbance. Habitat loss. Collision risk.

Feature	Summary	Potential adverse factors
		Noise.
Birds	The intertidal mud flats and saltmarsh provide feeding and roosting sites for internationally important populations of water birds (overwintering, summer migrants and residents). There is concern about the status of bird populations in the Mersey estuary with high alerts triggered for 6 out of the 12 water bird species evaluated. Potential reasons for the decline in numbers include pollution, disturbance, erosion and saltmarsh encroachment (British Trust for Ornithology (2006)).	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.
Marine Mammals	The Mersey estuary is relatively unimportant for cetaceans with harbour porpoise (listed on the Cheshire LBAP) and bottlenose dolphins the most frequently recorded from nearshore areas of Liverpool Bay. No major seal breeding sites but a large number of grey seals regularly use the outer area of the Dee Estuary for feeding and, at low water, haul out close to Hilbre Island. Common seals are only occasionally recorded (Natural England - Natural Areas - website). Otters are listed on the Cheshire LBAP.	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.

2.3 Tidal lagoon in Liverpool Bay

Table B.3. – Summary of key environmental sensitivities and constraints of a Tidal Lagoon in Liverpool Bay. (Adapted from Sustainable Development Commission 2007b).

Feature	Summary	Potentially adverse factors
Seabed sediments and transport processes.	Seabed of proposed site consists primarily of sand with varying amounts of silt and clay. The varied tidal regime and orientation of the coastline relative to the prevailing winds, results in complex sediment circulation. Waves and tidal currents strong enough to initiate significant transportation of sediment in the bay, resulting in large sand waves in some areas (Countryside Council for Wales (2002)). Longshore drift is an important component of the development of the system (Joint Nature Conservation Committee (1994)) with net sediment transport from west to east along the coast.	Physical disruption to tidal flows may affect sediment transport and functioning of the lagoon.
Water and sediment quality	There are large nutrient inputs from waste disposal and agricultural runoffs. Industry is comparatively light on this coast. The nature of some phytoplankton blooms occurring in Liverpool Bay. and associated coastlines can affect some beaches in North Wales (Coull et al. (1998)).	Disruption of tidal flows may allow accumulation of contaminants. Re-suspension of contaminated sediments.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
		Contamination.
Coastal habitats	Extensive areas of shingle present along the North Wales coast (NWP Offshore (2002)). Sand dunes are an important feature and dunes at Talacre and Gronant (east of site) represent the last surviving complex of north facing dunes in Wales east of Anglesey. Priority BAP habitats include sand dunes, and coastal vegetated shingle.	Loss of existing flood protection value of natural features such as dunes. Habitat change due to changes in wave exposure.
Landscape/ seascape	The study area comprises one national seascape unit, extending between Great Ormes to the Dee Estuary Unspoiled landscape/ seascape important factors to Welsh tourism (20% of holiday visits are to this coastline). Quarrying of aggregates on coast is widespread, however.	Visual intrusion. Noise. Habitat loss. Change to landscape character. Effects on tourism/ recreation due alterations to the physical environment.
Intertidal and subtidal habitats and communities	Strongly dominated by infauna in sandy sediments including the rare crab *Thia scutellata*. Important estuarine habitats present in the Clwyd, Dee and Mersey Estuaries.	Physical disturbance. Habitat loss. Habitat change due to changes in wave exposure. Changes in species composition.
Fish & shellfish	Cod (January to April), whiting (February to June), plaice (December to March), sole (March to May) and sprat (May to August) spawn in the area (Coull et al. (1998)). Nursery grounds for plaice and sole. Important area for elasmobranchs including basking sharks and rays that may be affected by Electromagnetic fields from sub sea cabling and physical disturbance.	Physical disturbance, particularly to migration routes. Electromagnetic field (EMF) disturbance. Habitat loss. Commercially exploited shellfish species (Crustacea and Mollusca) are present. Collision risk to fishing boats. Under water noise.
Birds	The north coast of Wales and the Dee Estuary important for wintering and passage wildfowl and waders. Liverpool Bay is important for non breeding common scoter and red throated	Disturbance during construction and maintenance.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	diver. The potential area covers where some of the main aggregations of wintering common scoter in the UK have been recorded. Other species of seabird have breeding or nursery colonies in the area. Bird vulnerability to surface pollution is highest during the summer (July to August), and during the winter (December to March), when wintering scoter and divers are present.	Loss of feeding habitat due to changes in benthic communities. Loss of marine wintering areas.
Marine mammals	Most common species are harbour porpoise (BAP priority species) and grey seal. Haul-out sites for grey seal present along the north coast of Wales. Highest concentration at the mouth of the Dee Estuary on Hoyle Bank. Minke whale, long-finned pilot whale, Risso's dolphin, bottlenose dolphin, and common dolphin have been recorded.	Underwater noise. Disturbance to feeding, migration and breeding behaviour. Collision risk from construction and maintenance boats.

2.4 Russell lagoons (Severn estuary)

Table B4. – Summary of key environmental sensitivities and constraints of the Russell Lagoons in the Severn Estuary. (Adapted from Sustainable Development Commission 2007d).

Feature	Summary	Potentially adverse factors
Seabed sediments and transport processes	A mixture of sands and muds, with notable areas of gravel exist off the coast of Cardiff. Muds dominate on the north coast between the mouths of the rivers, while patches of sandy gravel are also present throughout the estuary. Large areas of tide-swept hard substrata in the lower estuary (Tappin et al. (1994), Northern et al. (1998)). Widespread active sandwaves and megaripples, generally orientated northwest to southeast (Tappin et al. (1998).].	Strong tidal flows suspend, or retain in suspension, large amounts of sediment (Davies (1990)). Physical disruption to tidal flows may affect sediment transport. Alteration of estuary profile.
Hydrology	The estuary exhibits a large tidal range of over 12m on spring tides, peaking at 14.8m at Avonmouth, with peak spring tidal flows of 2-4m/s in deeper channels (Marshall (1999)). High levels of vertical mixing, suspended sediment and subsequently poor light penetration are experienced (Langston et al. 2003)). There is considerable freshwater input from the River Severn	Disruption of tidal flows, levels of vertical mixing and light penetration, salinity. Alteration of tidal prism. Alteration of terrestrial drainage patterns.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	and several other rivers. Salinities vary from approximately marine in the southwest to upper estuarine in the northeast (Northern et al. (1998)).	Change in wave Exposure.
Water and sediment quality.	Water quality is generally good in the inner estuary and fair in the middle and outer estuary (Marshall (1999)). Much of the area is heavily developed, and has historically received considerable inputs of industrial and urban waste. Contaminant and nutrient concentrations are higher around urban/industrial outfalls, sub-estuaries and the inner estuary (Langston et al. (2003)). There is little evidence to suggest modifications to biota due to contaminants (Langston et al. (2003)). In recent years, monitored discharges have very rarely failed to meet environmental quality standards (EQS) (Langston et al. (2003)).	Contamination. Re-suspension of contaminated sediments. Disruption of tidal flows may allow accumulation of contaminants.
Landscape/Seascape	The coastal landscape is predominantly low-lying with large areas of intertidal mudflats and sandflats at low tide. Largely agricultural and rural, although some parts of the coast are heavily urbanised. Relevant landscapes of outstanding historic interest include the Gwent Levels and the Lower Wye Valley.	Visual intrusion. Habitat loss. Change in landscape character. Increased coastal traffic. Direct physical impact on landscapes of outstanding interest.
Coastal habitats	The inner estuary includes extensive areas of saltmarsh, progressing inland to pasture (Langston et al. (2003)). Priority coastal habitats listed on relevant LBAPs include neutral grassland, coastal and floodplain grazing marsh, rivers and streams, coastal saltmarsh, reedbeds, coastal sand dunes, coastal vegetated shingle, maritime cliffs and slopes and saline lagoons (UK BAP website).	Physical disturbance. Habitat loss. Habitat change. Loss of existing flood protection value of natural features such as saltmarshes.
Intertidal and subtidal habitats and communities	Highly mobile subtidal and intertidal muds support very little infauna (Davies (1998)).	Physical disturbance. Habitat loss.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	Less mobile intertidal muds and sands support a low diversity but high abundance of a few bivalve, polychaete and small crustacean species (Northen (1998)). These provide an important food source for water birds. Typical rocky shore communities present near the mouth of the estuary, and at several small sites further upstream (Northen (1998)). The subtidal benthic fauna is generally species-poor due to scouring and the mobility of substrata. The reef-building worm Sabellaria alveolata dominates tide-swept hard substrata in the lower estuary, forming reefs unique to this location in the UK (Northen (1998), Davies (1990)).	Habitat change.
Plankton	Phytoplankton abundance is generally low, with limited seasonal variation. Greater abundance occurs in the inner estuary (Langston (2003)). Zooplankton is dominated by copepods and mysids in the inner and outer estuary respectively (Collins and Williams (1981). These plankton provide a key food source to higher trophic levels.	Changes in the plankton community. Harmful algal blooms.
Fish and shellfish	The estuary provides nursery areas for whiting, plaice and sole (Coull et al (1998)). Cod, whiting, bass, sole, plaice, flounder, dab, rays, salmon, sea trout, elvers and mullet are exploited in the region (Pawson et al (2002)). Important and vulnerable populations of several species of anadromous fish migrate to rivers entering the estuary. These fish use estuary waters for passage and feeding (Henderson (2003)). The burrowing brown shrimp *Crangon crangon* is abundant in many soft sediments, and is the main exploited shellfish species in the area (Pawson et al. (2002)).	Physical disturbance, particularly to migration routes. Electromagnetic field (EMF) disturbance. Habitat loss. Collision risk. Noise.
Birds	Supports internationally important populations of waders and wildfowl over-winter (94,000 individuals) and, to a lesser extent, waders on passage during the autumn and spring. Waders feed on high densities of burrowing invertebrates in intertidal mudflats and sandflats.	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	Seabird vulnerability to surface pollution is generally classified as low (Joint Nature Conservation Committee (1999)).	
Marine Mammals	Harbour porpoise are commonly sighted throughout the area, and three species of dolphin are occasionally sighted in the Bristol Channel (Reid et al. (2003). There are no known important haul-out or breeding sites for seals in the estuary (Joint Nature conservation Committee (2007)).	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.
Riverine Mammals	Otters are present in the Usk and Wye rivers	Dependence on fish including migratory species such as eels.

2.5 Swansea Bay lagoon (Severn estuary)

Table B.5. – Summary of key environmental sensitivities and constraints of the Swansea Bay Lagoon in the Severn Estuary. (Adapted from Sustainable Development Commission 2007d).

Feature	Summary	Potentially adverse factors
Seabed sediments and transport processes.	Extensive area of muddy sand with sands, gravels and hard substrates in more exposed areas and offshore (Davies (1998)). Strong tidal flows and waves cause high turbidity and generate a range of sand bedforms. The bay is an open system, receiving sediment inputs from either the eastern Bristol Channel or an unspecified source to the west, and outputting this material around the southern Gower and Helwick area to the west (Pethick and Thompson (2002)). Models suggest complex sediment transport between coastal beaches and offshore banks Pethick and Thompson (2002)). Concerns over coastal erosion at beaches in the area including Blackpill, Swansea SSSI, Crymlyn Burrows SSSI, Kenfig SAC, and the south Gower beaches, at Aberavon seafront, Margam Sands, Kenfig Sands and Rest Bay (Countryside Council for Wales communication).	Physical disruption to tidal flows may affect sediment transport.
Hydrology	Water depths range between 5-8m with deeper water (20-30m) offshore. Mean spring tidal range is 8-10m (Department for trade and Industry (2004)). Water levels may exceed this in periods of storms. Peak flow for a mean spring tide varies from 1-2m/s in offshore	Disruption of tidal flows, levels of vertical mixing and light penetration. Exposed to prevailing SW wind and resultant wave action.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	areas to 0.25-0.5m/s nearshore (Department for trade and Industry (2004)). Models suggest anticlockwise residual tidal currents to occur north and west of Port Talbot, with clockwise movement to the southeast (Pethick and Thompson (2002)). Annual mean significant wave height is 1-1.2m (Department for trade and Industry (2004)).	
Water and sediment quality	Water quality generally good to excellent although bathing water at Port Talbot classified as poor in 2006 (Environment Agency website). Contamination of sediments due largely to historic industrial and urban discharges.	Contamination. Re-suspension of contaminated sediments. Disruption of tidal flows may allow accumulation of contaminants.
Landscape/ seascape	Landscape characterised by rocky cliffs, sand dunes and beaches with seaside villages and industrial/port frontage. Seascape units include: Mumbles Head to West Pier, Swansea Docks and environs, Neath Estuary, Port Talbot West and Aberavon Sands, Port Talbot East and Steel Works (White Consultants (2002)). Designated landscapes include the Gower AONB and the Gower and Glamorgan Coast Heritage Coasts. Relevant landscapes of outstanding historic/special interest include the Gower, Cefn Bryn Common, Margam Mountain, Merthyr Mawr, Kenfig and Margam Burrows.	Visual intrusion. Habitat loss. Change to landscape character. Increased coastal traffic. Direct physical impact on landscapes of outstanding interest.
Coastal habitats	Priority BAP habitats include coastal saltmarsh, sand dunes, vegetated shingle, maritime cliffs and slopes, and coastal and floodplain grazing marsh (UKBAP website).	Habitat change due to changes in wave exposure. Loss of existing flood protection value of natural features such as saltmarshes.
Intertidal and subtidal habitats and communities	Range of shoreline types from moderately exposed to sheltered shores, and substrates ranging from rocky shores to sand and mud (Countryside Council for Wales communication). Extensive Sabellaria alveolata reefs between Mumbles and Swansea. These are listed as a priority habitat in the Swansea LBAP with intertidal and subtidal piddocks in peat and clay listed as	Physical disturbance. Habitat loss. Habitat change due to changes in wave exposure.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	a local habitat. Other priority habitats present include mudflats, seagrass beds, subtidal sands and gravels, and sheltered muddy gravels (UKBAP website). Mackie et al. (2006) described benthic communities present in the outer Bristol Channel	
Plankton	Phytoplankton growth limited by the high turbidity of the water column (DEFRA (2000)). Severn Estuary tidal energy from non-barrage options. Spring growth dominated by diatoms in April and May, followed by dinoflagellates. Calanoid copepods dominate the zooplankton assemblage which varies with salinity (Collins and Williams (2001)).	Harmful algal blooms.
Fish and shellfish	Sandy areas typified by large numbers of juvenile flatfish and sand-eels, with seasonal influxes of sprat, herring, juvenile gadoids, mullet and bass (Collins and Williams (2001)). Nursery area for plaice, sole and whiting (Coull et al. (1998)). Rocky shore fish assemblages dominated by small species such as wrasses, gobies and blennies. Relatively diverse elasmobranch fauna with important egg case deposition sites and nursery areas recorded (e.g. thornback rays) (Countryside Council for Wales communication). Fish of conservation importance including migratory shads, lampreys, salmon and sea trout may be present (Henderson (2003)). BAP species present include allis and twaite shads, basking shark, flatfish, hake and cod, other sharks and monkfish. Native oyster beds present although much reduced (Laing et al. (2005)). Other exploited species include cockles, mussels, crabs and lobsters (Pawson et al. (2002)).	Physical disturbance, particularly to migration routes. Electromagnetic field (EMF) disturbance. Habitat loss Collision risk. Noise.
Birds	Swansea Bay provides an important over-wintering and passage site for a large number of waders (Countryside Council for Wales website). Network of 3 sites of special scientific interest (SSSI) supports nationally important wader populations. Large numbers of black-headed gull, herring gull and common gull	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.

Feature	Summary	Potentially adverse factors
	with lesser and great-black backed gulls also present (Collier et al. (2005)). Overall sensitivity to surface pollution is low (Joint Nature Conservation Committee (1999)).	
Marine mammals	Mumbles Head, Port Eynon Head and Worm's Head important locally for harbour porpoise. Low numbers of common dolphin also recorded (Watkins and Colley (2004)). No known haul-out or breeding sites for seals although seals may forage within the region (Joint Nature Conservation Committee (1999)). BAP species include otters, harbour porpoise, small dolphins, grouped plans for baleen whales and toothed whales.	Physical disturbance. Habitat loss. Noise.

3 ANNEX C: INFORMATION FROM THE NETHERLANDS

3.1 Oosterschelde Kering (Drie Maandelijks Bericht Deltawerken, nr.80).

zoetwaterbekken in plaats van een aan getijbeweging onderhevige zoute zeearm. In dit opzicht bestaat er evenzeer voorkeur voor een zo westelijk mogelijk gelegen tracé van de Oosterscheldedam.
Hoewel niet van belang voor de tracé-keuze is het wellicht nuttig te wijzen op de mogelijke ongunstige invloed die diepe kommen, die met soortelijk dichter en wellicht op den duur zuurstofloos water gevuld zouden kunnen blijven, op de waterhuishouding en met name op de waterkwaliteit zouden kunnen hebben. Reeds in een vroeg stadium van het onderzoek naar de toekomstige waterhuishouding van de Deltawerken is die problematiek onderkend en sedertdien zijn onder andere in het Brielse Meer en het Veerse Meer situaties met grote waterdiepte onderzocht. Gebleken is daarbij dat onder invloed van de wind in het water circulatie-stromingen optreden, die ook de diepe kommen niet onberoerd laten en aldus de kwaliteit van het water in die diepe kommen in gunstige zin beinvloeden. Buitendien is door proefnemingen gebleken, dat op betrekkelijk eenvoudige en weinig kostbare wijze (door het inblazen van lucht in het zoute water op de bodem van de diepe kommen) de ongunstige invloed van een gelaagdheid van het water door verschil in soortelijk gewicht kan worden opgeheven (zie Driemaandelijks Bericht nr. 37, augustus 1966). De toekomstige situatie mag derhalve met vertrouwen worden tegemoet gezien; overigens worden de studies en het onderzoek van deze aangelegenheid, in samenwerking met onder andere biologische deskundigen, onverminderd voortgezet.
Een laatste, maar zeer belangrijk waterhuishoudkundig aspect bij de tracé-keuze van de Oosterscheldedam vormt de aanpassing van de kust en de onderwaterdelta aan de situatie met afgesloten zeegaten, waardoor de lozingsmogelijkheid ter plaatse van de Oosterscheldedam wordt beïnvloed. Aan het blijven voortbestaan van de mogelijkheid van natuurlijke lozing van grote hoeveelheden water naar de mond van de Oosterschelde ten behoeve van de waterkwaliteitsbeheersing op het Zeeuwse Meer moet grote waarde worden gehecht.
Op langere termijn bezien zou de kustontwikkeling na de afsluiting van de Oosterschelde de lozing op de zee kunnen bemoeilijken. Gesteld mag echter worden, dat bij alle onderzochte tracés voor deze lozing een oplossing gevonden kan worden.

Wat betreft de verkeersfunctie van de Oosterscheldedam kan worden geconstateerd dat de hoofdverkeersweg op deze dam, als onderdeel van het toekomstige patroon van hoofdverkeerswegen in de delta – men zie ondermeer het Structuurschema Hoofdwegennet – een belangrijke bijdrage kan leveren tot een betere ontsluiting van het Deltagebied in het algemeen, terwijl de wegen op de dam meer specifiek een uiterst belangrijke bijdrage kunnen leveren tot de ontsluiting van de Deltakust voor het recreatieverkeer. Uit dien hoofde is een tamelijk westelijk gelegen tracé te verkiezen. Opdat ter plaatse van de aansluiting op de kust van Schouwen en de kust van Noord-Beveland in verkeerstechnisch opzicht geen gewrongen situaties ontstaan, verdient een ten opzichte van Westerschouwen respectievelijk het oostelijk einde van de Veersche Gatdam iets teruggelgen tracé van de Oosterscheldedam evenwel de voorkeur. Hoewel tracé A in dit opzicht wat gunstiger ligt dan tracé C, is toch ook bij dit laatste, eventueel na enige aanpassing van het oostelijk gedeelte van de Veersche Gatdam, een verkeerstechnisch goede oplossing mogelijk.
Nadat vroeger van de zijde van de Rijkswaterstaat de gedachte is geopperd om in één van de Deltadammen een getijcentrale te bouwen en deze gedachte na uitvoerig onderzoek vervolgens om meer dan één reden is verworpen, is van de zijde van de Provinciale Zeeuwsche Electriciteits Maatschappij meer recent opnieuw dit idee naar voren gekomen met betrekking tot de Oosterscheldedam.

358

Hoewel men van de zijde van de Rijkswaterstaat geen enkele reden heeft thans anders te staan tegenover het vraagstuk van de wenselijkheid respectievelijk de mogelijkheid van het exploiteren van een getijcentrale in de Oosterscheldedam, kan deze problematiek als zodanig hier onbesproken blijven; van belang is eventueel slechts in hoeverre een getijcentrale in de Oosterscheldedam van invloed kan zijn op de tracé-keuze van de dam. Daarbij valt op te merken dat de bouw van de Oosterscheldedam een zo omvangrijk en moeilijk werk is dat het ontoelaatbaar moet worden geacht bijbehorende factoren te introduceren die de bouw van de dam nog verder zouden compliceren of op onverantwoorde wijze zouden vertragen. Zo er al zou worden besloten tot de aanleg van een getijcentrale, dan zal dit ook alleen kunnen geschieden nadat de dam als zodanig is voltooid. De wens om ten behoeve van een eventuele getijcentrale te kunnen beschikken over een zo groot mogelijk getijbekken pleit voor een zo westelijk mogelijk tracé van de Oosterscheldedam. De noodzaak om ten behoeve van een dergelijke centrale te kunnen beschikken over naar zee leidende toe- en afvoergeulen van voldoende capaciteit vormt een ander aspect. Er van uitgaande dat om waterstaatkundige redenen in ieder geval een tamelijk westelijk gelegen tracé zal worden gekozen, is de beslissing van het al dan niet hebben van een getijcentrale in de Oosterscheldedam verder niet van invloed op de tracé-keuze voor deze dam.

Alle aspecten en belangen die hier ter sprake werden gebracht, geven dus geen aanleiding tot een ander inzicht betreffende de tacé-keuze. Tracé C is op grond van de doorslaggevende argumenten, zoals de waterloopkundige en grondmechanische aspecten, de risico's tijdens de uitvoering en de uiteindelijk te bereiken veiligheid het tracé dat het meest in aanmerking komt voor het leggen van een afsluitdam in de Oosterschelde.

De Raad van de Waterstaat heeft zich uitgesproken voor keuze van het in de nota genoemde tracé C, en de Minister heeft het voorstel daarna aanvaard. De nota is vervolgens, naar de Deltawet voorschrijft, ter beoordeling voorgelegd aan Gedeputeerde Staten van de betreffende provincie, in dit geval Zeeland. G.S. van Zeeland hebben laten weten dat zij met het gekozen tracé en de motivering daarvan volledig kunnen instemmen. Het Koninklijk Besluit waarin het plan definitief is vastgesteld, is inmiddels verschenen.

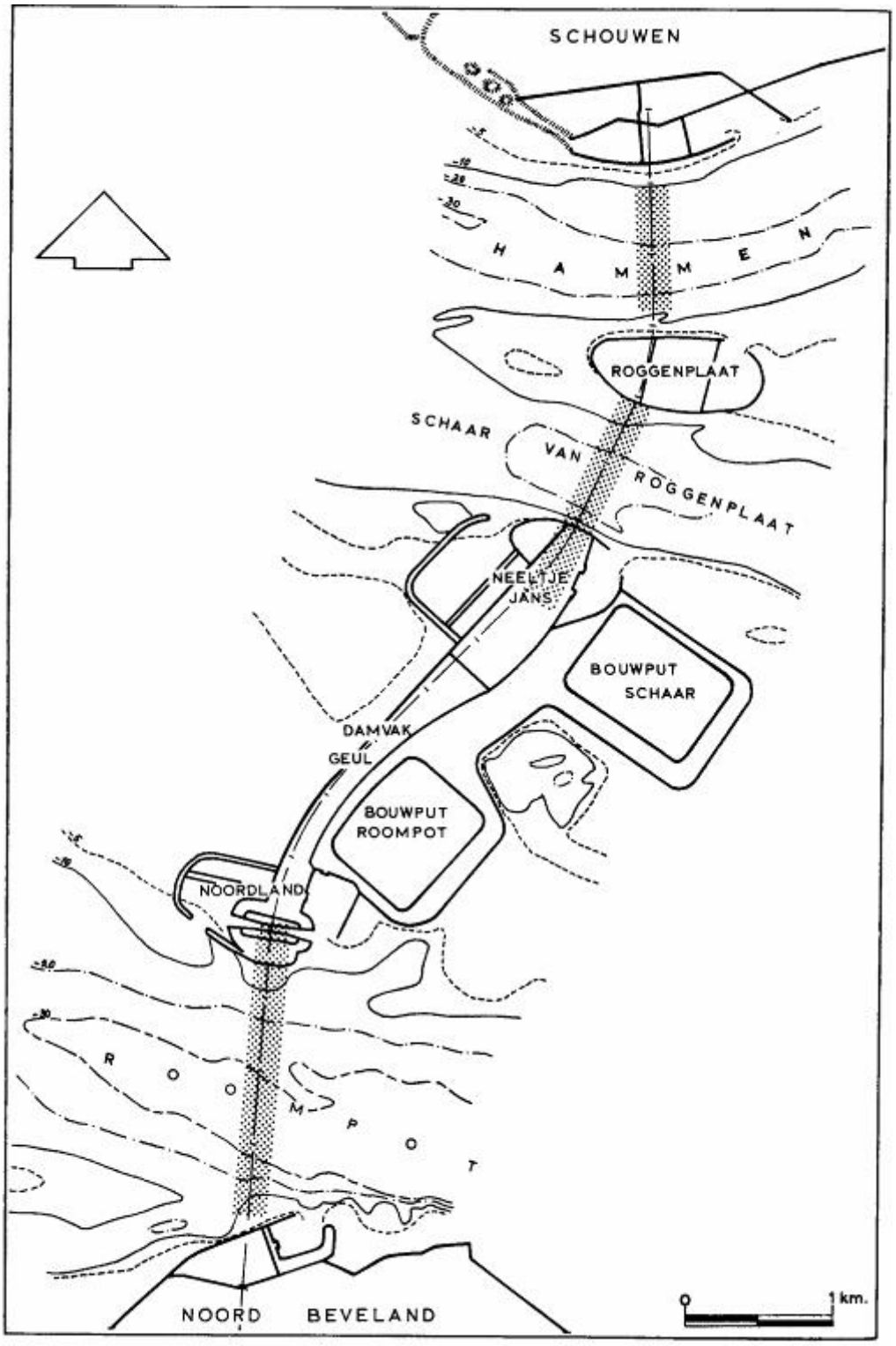
359

3.2 Een getijcentrale in de Oosterschelde

Een getijcentrale in de Oosterschelde?

De discussie over de afsluiting van de Oosterschelde heeft uiteindelijk geleid tot het besluit een doorlatende, afsluitbare dam te bouwen in de mond van de zeearm, en het bekken verder te compartimenteren. In samenhang daarmee is ook het denkbeeld weer bovengekomen een getijcentrale te bouwen in het Deltagebied. Dit idee is niet nieuw; al in 1917 werd gesproken over de eventuele bouw van een waterkrachtwerk in dit gebied, zij het van veel kleinere afmetingen dan waaraan nu gedacht wordt. Verscheidene artikelen in het tijdschrift 'de Ingenieur' uit de dertiger jaren tonen aan, dat aan dit onderwerp in Nederland wel voortdurend enig denkwerk is besteed. In 1948 maakte ir. F. J. Vos een studiereis naar Frankrijk, om zich te verdiepen in de problematiek van waterkrachtwerken in het algemeen en van getijcentrales in het bijzonder. Deze studie is gevolgd door een onderzoek naar de mogelijkheden van een getijcentrale in onder andere de Oosterschelde. Alleen de technische en economische aspecten werden door De Vos in beschouwing genomen. Van dit onderzoek is in 1954 een rapport verschenen ten behoeve van de Deltacommissie, dat onder meer een ontwerp inhield voor een getijcentrale in de Westerschelde. Zoals bekend is de door De Vos ontworpen centrale niet gerealiseerd. Het beschikbare verval bleek te gering om een rendabele energieproduktie tot stand te kunnen brengen, zeker gezien de schijnbaar eindeloze voorraad nog goedkope brandstoffen waarmee conventionele centrales werden gestookt.
In 1967 is nogmaals een onderzoek naar een getijcentrale uitgevoerd, dit keer door de Provinciale Zeeuwse Elektriciteits Maatschappij. Een hernieuwd onderzoek was gerechtvaardigd omdat de turbinetechniek sinds 1954 een opmerkelijke ontwikkeling had doorgemaakt. Vooral Franse onderzoekingen in verband met de getijcentrale in de Rance hadden geheel nieuwe mogelijkheden geopend. De belangrijkste vooruitzichten bood wel de ontwikkeling van een turbine die doorstroming toeliet in twee richtingen, zodat vrijwel de gehele getijcyclus benut kon worden voor energie-opwekking. Ook dit onderzoek echter leidde tot de conclusie, dat de bouw van een getijcentrale op economische gronden afgewezen moest worden.
Er is echter reden om het vraagstuk van de getijcentrale thans opnieuw aan de orde te stellen. Op bepaalde aspecten van het probleem valt nu, onder meer als gevolg van de sterk gewijzigde energie-kosten in de wereld, een geheel ander licht. In de vorige studies is ook nog nimmer een bekken beschouwd ter grootte van vrijwel de gehele Oosterschelde, gerelateerd aan de huidige turbinetechnologie. De Vos heeft weliswaar verscheidene alternatieven onderzocht, waarbij de enige mogelijkheid om een rendabele centrale te bouwen situering inhield bij Bath in de Westerschelde, maar zijn berekeningen waren alle gebaseerd op enkelwerkende turbines en op de kolenprijs van die tijd. De brandstofprijzen voor conventionele centrales zijn de laatste jaren echter sterk gestegen.
De getijcentrale kan bovendien fungeren als afsluitbare doorlatende dam, waarbij de turbines als afsluitmiddel kunnen fungeren. De economie ervan komt dan in een geheel nieuw licht te staan.
Als men op de stichtingskosten een bedrag

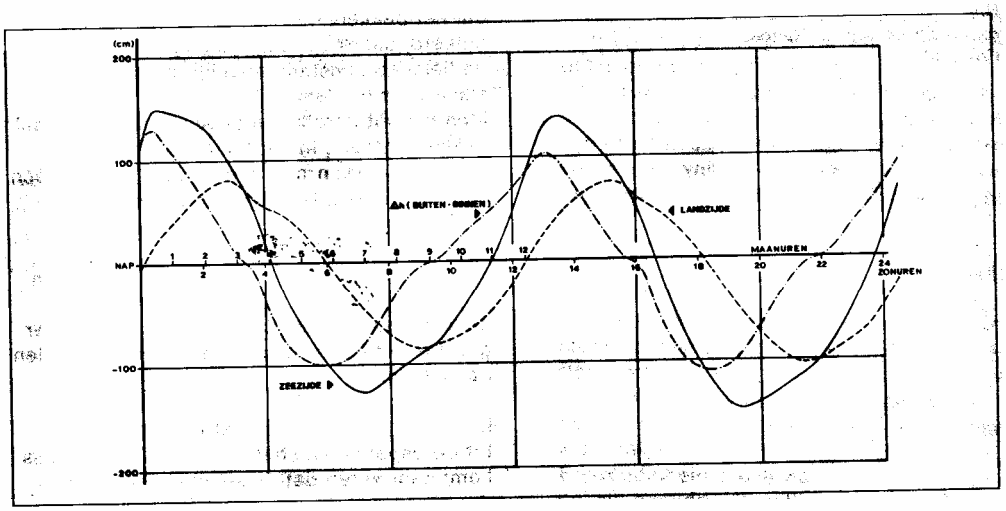
563


SCHOUWEN
H A M M E N
ROGGENPLAAT
SCHAAR VAN ROGGENPLAAT
NEELTJE JANS
BOUWPUT SCHAAR
DAMVAK
GEUL
BOUWPUT ROOMPOT
NOORDLAND
R O O M P O T
NOORD BEVELAND
0
1 km.

564

Fig. 1. Overzicht van de Oosterschelde-afsluiting. In de gearceerde gedeelten kan een getijcentrale worden opgesteld

Fig. 2. Gemiddeld verticaal getij aan weerszijden van de Oosterschelde-afsluiting, bij een getijverschil van 2,30 m te Yerseke



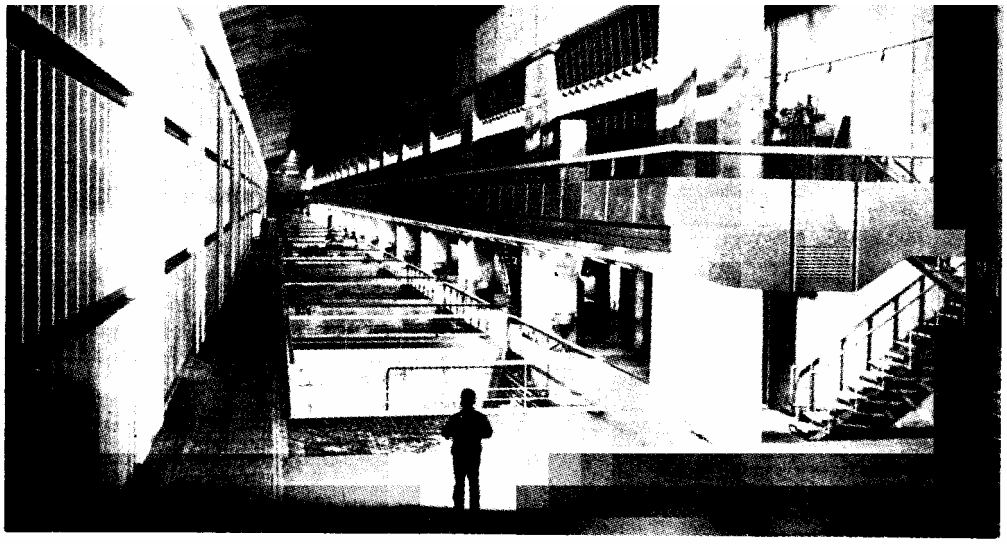
in mindering mag brengen ter grootte van de stichtingskosten van een doorlatende, afsluitbare stormvloedkering, kan er wellicht een heel andere KWh-prijs uitkomen. Uiteindelijk zal die prijs, wanneer de technische problemen niet onoverwinnelijk blijken, zoals men begrijpt de doorslag geven.

Getij-energie

Getij-energie wordt reeds sedert eeuwen gebruikt voor het aandrijven van allerhande werktuigen. De potentiële en kinetische energie van het water werd daarbij omgezet in de bewegingsenergie van het werktuig. De opgewekte energie werd dus altijd in de onmiddellijke omgeving van de 'getijmolen' gebruikt. Omzetting van getij-energie in transportabele, meestal elektrische energie, vindt pas sinds de laatste tien jaar plaats.

Op dit moment zijn er in de hele wereld twee getijcentrales in bedrijf. Eén in de Rance in Bretagne in Frankrijk, werkend onder een gemiddeld verval van 8,2 m met een geïnstalleerd vermogen van 240 MW verdeeld over 24 eenheden. De tweede is een experimentele Russische getijcentrale in de Kislaya baai, die werkt onder een gemiddeld verval van 3,3 m met een geïnstalleerd vermogen van 400 kW. Deze centrale heeft de vorm van een caisson die ter bestemder plaatse is afgezonken.
De andere plannen voor het stichten van een getijcentrale zijn blijven steken in de fase van de onderzoekingen, zoals bijvoorbeeld de plannen voor een getijcentrale bij het Passaquoddy Estuarium op de grens van de V.S. en Canada aan de Atlantische Oceaan, de Baai van Fundy in Canada, Cook Inlet in Alaska en San José in Argentinië. Sinds kort is opnieuw een getijcentrale in studie genomen in het estuarium van de Severn in het Kanaal van Bristol, nadat op eerdere studies op economische gronden een negatieve beslissing was gevolgd.
De op- en neergaande beweging van het water in een getijgebied is de oorzaak van het feit dat ten opzichte van een bepaald niveau altijd een verval gecreëerd kan worden, uitgezonderd die momenten waarop de waterstand en het niveau van vergelijking aan elkaar gelijk zijn. Doordat het getij een op- en neergaande beweging maakt kan het verval zowel positief als negatief zijn, zolang het niveau van vergelijking zich maar in het intergetijgebied bevindt.
Dit verval vertegenwoordigt een hoeveelheid potentiële energie, die benut kan worden

565



Blik in het inwendige van de getijcentrale van La Rance, Frankrijk

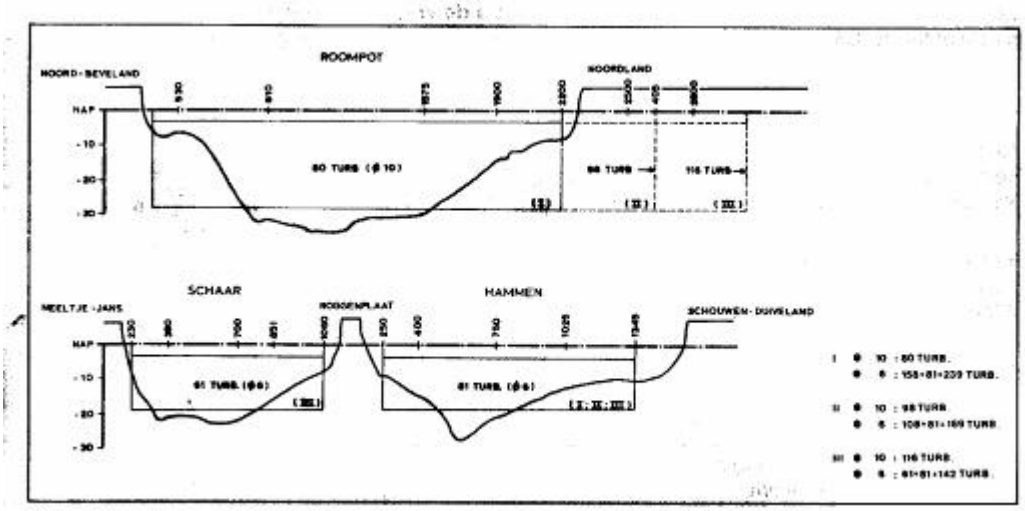
voor de opwekking van bewegingsenergie. Een getijcentrale is een doorlaatorgaan waarover een verval gecreëerd wordt en waarin turbines en elektrische generatoren geïnstalleerd zijn teneinde dit verval, via de bewegingsenergie van de turbines, om te zetten in transportabele elektrische energie. Aan de ene zijde van de dam ligt dus het getijgebied, de zee, aan de andere kant een bekken, al dan niet met een constant niveau. Laten we aannemen dat het probleem waarmee men zich bezighoudt bij het ontwerpen van getijcentrales zich in eerste instantie zal toespitsen op de vraag hoe gedurende een zo lang mogelijke tijd een zo groot mogelijke hoeveelheid energie geproduceerd kan worden.
Aangezien er aan de zeezijde niets valt te regelen, komt het er in de praktijk op neer dat het bekkenniveau zo moet worden gereguleerd, dat er zo lang mogelijk een groot en liefst zo constant mogelijk verval blijft staan over de dam.
Men kan dit bereiken met een enkel of dubbel bekkensysteem; in het laatste geval heeft men één bekken met een hoog niveau en één bekken met een laag niveau, en worden de niveau's onderling geregeld met turbines of sluizen.
Ter regeling van de produktiegrootte kunnen ook al dan niet gekoppelde meervoudige bekkensystemen gehanteerd worden. In ieder geval is het duidelijk dat er vele mogelijkheden openstaan.

Maar het probleem beperkt zich niet tot de bepaling van het verval. Uit alle studies komt naar voren dat de stichtingskosten van doorslaggevende aard zijn. Zij bepalen namelijk de economische mogelijkheden van een getijcentrale. Het te installeren vermogen aan turbines en generatoren in relatie tot het verval is derhalve een optimaliseringsprobleem. Een op maximale energieproduktie gedimensioneerde centrale kan zo kostbaar worden in relatie tot de energieopbrengsten, dat een kleinere centrale, werkend onder hetzelfde verval, ondanks een geringere vermogensopstelling economischer kan zijn; het verband tussen energieproduktie en stichtingskosten is niet lineair.
Waar het op aankomt, zo blijkt uit het voorgaande, is de regeling van het niveau van het bekken. Ten aanzien van het Oosterscheldeprobleem treedt hier nu een wezenlijk verschil op met de eerder geschetste situaties. Het hoofddoel van een doorlatende dam in de mond van de Oosterschelde is het in stand

566

houden van een kwalitatief goed aquatisch milieu. Hiervoor dient zoveel water per dag in en uit het Oosterscheldebekken te stromen dat een bepaald gemiddelde getijverschil te Yerseke, bijvoorbeeld 2,30 m, gehandhaafd blijft.
Deze voorwaarde is een zo strenge eis, dat er geen enkele ruimte gelaten wordt voor het regelen van het niveau van het Oosterscheldebekken, in die zin dat er vergroting van het verval uit volgt. Dit impliceert, dat veelal gebruik gemaakt zal moeten worden van een verval over de dam, dat in genendele het maximaal haalbare is. Dit door de 'natuur' gegeven verval is ook niet constant te maken, zodat het te benutten vermogen voortdurend verandert.
De problemen die zich hierdoor zullen voordoen bij de belasting van het elektrisch net, dus bij de energie-afgifte, zullen hier niet in beschouwing worden genomen.
De studie van de P.Z.E.M. was met betrekking tot dit probleem optimistisch: kennelijk werd verondersteld dat het landelijk koppelnet hiervoor een aanvaardbare oplossing zal kunnen bieden.
Uit milieukundig oogpunt is het gewenst dat in de Oosterschelde het gehele scala aan getijvormen optreedt, zij het ook in gereduceerde vorm. Ook een stand waarbij de schorren worden overstroomd moet toch wel eens per jaar worden bereikt. Met een 'conventionele' stormvloedkering is dit eenvoudig te realiseren. Een getijcentrale zal echter een aan de milieueisen aangepaste installatie dienen te hebben. Kenmerkend voor deze installatie is dat de energieproduktie ondergeschikt is aan de getijdemping: zodra het 'ontwerpverval' wordt overschreden wordt de turbine losgekoppeld van de generator, waardoor de debietdoorlaatcapaciteit groter wordt. Weliswaar gaat dit niet zonder problemen, maar in ieder geval kunnen grotere vervallen dan het als normaal geldende ontwerpverval optreden en de daarbij behorende debieten doorgelaten worden.
De berekeningen die antwoord moeten geven op de vragen betreffende de energieproduktie zijn groot in aantal vanwege het voortdurend veranderen van de getijbewegingen en even omvangrijk als het beschouwde bekken groot is.
De getijbeweging staat onder invloed van allerlei factoren, zoals de dagelijkse ongelijkheid, de veertiendaagse periodiciteit van spring- en doodtij, opwaaiingsverschijnselen, stormvloeden met bepaalde overschrijdingsfrequenties en veranderingen in de banen van aarde en maan. Ook veranderingen in de bodemconfiguratie compliceren het vraagstuk aanzienlijk.
Eenvoudigheidshalve wordt uitgegaan van enkele gemiddelde getijden, te weten de

Fig. 3. Alternatieve turbineopstellingen in de sluitgaten van de Oosterschelde



gemiddelden van de 10-jarige periode 1951–1961, van spring-, gemiddeld en doodtij.
Ten behoeve van het Oosterschelde-onderzoek zijn computerberekeningen uitgevoerd waarbij in de mond van de Oosterschelde een dam wordt verondersteld, waarin onder water openingen zitten met zulke afmetingen, dat te Yerseke een bepaald getijverschil optreedt.
Er zijn onder meer berekeningen uitgevoerd met een Oosterscheldebekken gecompartimenteerd volgens model C3, dus met Oester- en Philipsdam en de eerdergenoemde getijden als randvoorwaarden op zee en zulke openingen, dat te Yerseke gemiddelde getijverschillen optreden van 1,85 m, 2,30 m en 2,60 m. Uit deze berekeningen volgt onder meer het getijverloop aan weerszijden van de dam. Over de hoedanigheid van de dam weet men dan verder nog niets, behalve dan dat de hoeveelheden water bekend zijn, die de dam zullen moeten passeren om een bepaald getijverschil te veroorzaken te Yerseke. Uit de verkregen waterstanden kunnen vervolgens zowel de vervallen als de debieten bepaald worden. Voor de vermogensberekeningen zijn dan alle benodigde gegevens voorhanden.

Berekeningen en resultaten

Op grond van de literatuur is aangenomen, dat er energie geleverd kan worden als het verval groter is dan 50 cm. Bij kleinere vervallen draaien de turbines wel, maar het rendement daarvan is dan zo laag, dat de geproduceerde hoeveelheden verwaarloosd kunnen worden. De resultaten van de berekeningen zijn als volgt: Aangenomen wordt een getij dat beantwoordt aan de waarden van de slotgemiddelden 1961.0 en een compartimentering C3.
De bijbehorende maximale debieten tijdens springtij zijn 45 000 m^3/sec, 55 000 m^3/sec en 71 000 m^3/sec. Een jaar heeft gemiddeld 706 getijden.
Teneinde een vergelijking mogelijk te maken met bestaande thermische centrales is in de tabel aan de voet van deze pagina een kolom Peq opgenomen. Om de vergelijking zuiver te houden, dienen deze waarden met ongeveer 20% reservecapaciteit verhoogd te worden; er zou dus een thermische centrale van 170 MW gebouwd moeten worden om dezelfde hoeveelheid energie te kunnen produceren als een getijcentrale zou doen bij een gedempt getij te Yerseke van 2,30 m.
Ter vergelijking de volgende cijfers. In de gemeente Den Haag staat een thermische centrale met een geïnstalleerd vermogen van 180 MW, echter in normale bedrijfstoestand gekoppeld aan andere centrales via het landelijk koppelnet. Theoretisch kan Den Haag zich zelf bedruipen. De centrale levert vrijwel uitsluitend aan bewoners. In een kleinere plaats, maar met meer industrie, als Dordrecht, is het geïnstalleerd vermogen van de centrale 530 MW. In Rotterdam is 1500 MW geïnstalleerd, terwijl een uitbreiding met 1080 MW ten behoeve van de Maasvlakte gereed is.
Uit deze cijfers blijkt wel, dat de opbrengst van een getijcentrale in de mond van de Oosterschelde slechts te vergelijken is met de opbrengst van een kleine conventionele centrale, terwijl de vermogensinstallatie middelgroot dient te zijn. Hierbij komt nog het nadeel van de met het getij verlopende produktie. Dit vereist extra voorzieningen in verband met de afname, vooral omdat de maximale opbrengsten door het verloop van het getij ook 's nachts zullen plaatsvinden als de vraag het kleinst is.
Als men dus moet uitgaan van een totaal te

Gem. getij-verschil te Yerseke	Gemiddeld getij					
	P max	E per getij	E per jaar	P eq	P max	P max
1,85 m	478 MW	1793 MWh	1265 GWh	144 MW	677 MW	311 MW
2,30 m	497 MW	1761 MWh	1243 GWh	141 MW	730 MW	309 MW
2,60 m	431 MW	1195 MWh	844 GWh	96 MW	673 MW	243 MW

P = geïnstalleerd vermogen
Peq = overeenkomstig vermogen van een conventionele centrale
E = energie-opbrengst
1 GWh = 1 miljoen KWh.

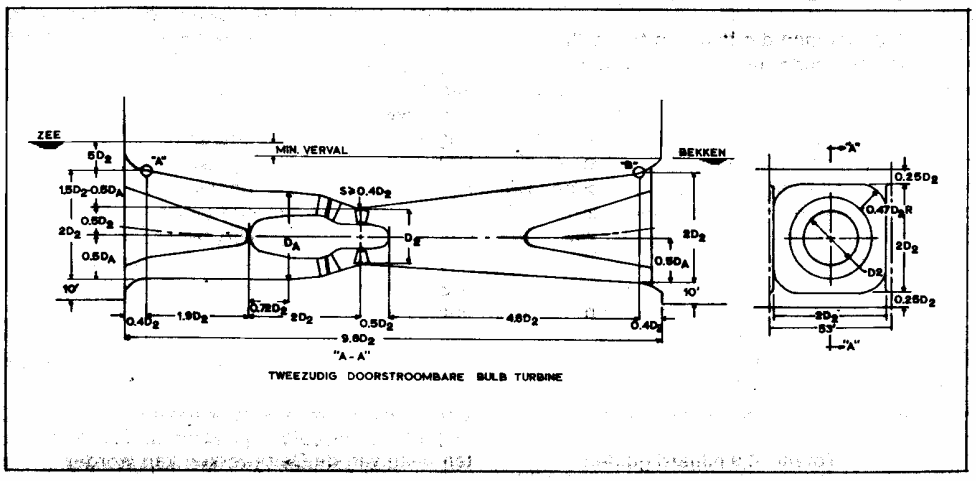
568

installeren vermogen van 734 MW, dan zou een turbine met een waaierdiameter van 6 m in de mond van de Oosterschelde een vermogen aan de generator afgeven van 1,6 MW. Een generator van dat vermogen moet gezien worden als een lilliput-generator.
Ter vergelijking het volgende: In de getijcentrale 'La Rance' is de waaierdiameter van de turbine 5,32 m; aan de generator wordt een vermogen afgegeven van 10 MW. Deze centrale is nu 8 jaar in gebruik; het verval bedraagt 8,5 tot 10,5 m. De getijcentrale te Fundy Bay, die uit economische overwegingen niet is uitgevoerd, zou hebben gedraaid op een tijverschil van 7,5 tot 15 m. Bij een waaierdiameter van 7,5 m zou elke turbine 34 MW hebben afgegeven aan de generator en bij een waaierdiameter van 10 m zelfs 65,2 MW. Het wordt uit deze voorbeelden wel duidelijk, dat de eisen met betrekking tot de totale debietlevering en die inzake grote vermogensopbrengsten in het Oosterscheldegebied moeilijk met elkaar te combineren zijn. In de Roompot zou de plaatsing van turbines met een doorsnede van 10 m mogelijk zijn; voor de Schaar van Roggeplaat en de Hammen zou een doorsnede van 6 m de aangewezen maat zijn. Om de vereiste 55 000 m^3/sec te realiseren, is dan een groot aantal combinaties mogelijk, die ieder een bepaalde hoeveelheid grondverzet vergen. Als voorbeeld geven we hier drie mogelijke combinaties.

I)	Roompot	doorsnede 10 m	80 stuks
	Schaar	doorsnede 6 m	158 stuks
	Hammen	doorsnede 6 m	81 stuks
II)	Roompot	doorsnede 10 m	98 stuks
	Schaar	doorsnede 6 m	108 stuks
	Hammen	doorsnede 6 m	81 stuks
III)	Roompot	doorsnede 10 m	116 stuks
	Schaar	doorsnede 6 m	61 stuks
	Hammen	doorsnede 6 m	81 stuks

Als de turbines zouden worden aangebracht in afzinkbare caissons, dan zouden per caisson van 75 m lengte niet meer dan drie venturi-openingen met een doorsnede van 10 m en vijf venturi's met een diameter van 6 m gemaakt kunnen worden. Dit vereist dan, in de genoemde drie gevallen:

Fig. 4. Venturi met bulbturbine, ontworpen voor de Fundy Bay centrale



I) 80 venturi-openingen van 10 m doorsnee: 27 caissons
239 venturi-openingen van 6 m doorsnee: 48 caissons

Totaal: 75 caissons

II) 98 venturi-openingen van 10 m doorsnee: 33 caissons
189 venturi-openingen van 6 m doorsnee: 38 caissons

Totaal: 71 caissons

III) 116 venturi-openingen van 10 m doorsnee: 39 caissons
142 venturi-openingen van 6 m doorsnee: 28 caissons

Totaal: 67 caissons

Aantallen turbines Ø 10 m en Ø 6 m			Kosten in miljoenen guldens (prijspeil 1974)					
			Elektrisch gedeelte	Betonwerk	Plaatsen	Natte werken	Diversen	Totaal
I	80	239	2100	2600	800	1500	500	7500
II	98	189	2000	2500	800	1500	500	7300
III	116	142	2000	2300	800	1500	500	7100

Bovendien zijn deze caissons slechts in zeer beperkte mate vergelijkbaar met de caissons met venturibuizen met rechthoekige doorsnede die volgens de zogenaamde 'caisson-oplossing' zouden worden geplaatst in de Oosterscheldedam.
De caissons voor de getijcentrale zouden ongeveer twee maal zo diep zijn in de stromingsrichting en ongeveer anderhalf maal zo hoog; de lengte ervan zou gelijk kunnen zijn.
De kostenramingen die behoren bij de drie hiervoor genoemde installatie-alternatieven worden samengevat in bovenstaande tabel.

In het extreme geval dat alleen turbines met een doorsnee van 10 m zouden worden geïnstalleerd – er wordt dan dus voorbijgegaan aan grondmechanische problemen, vooral in de Hammen – zouden de kosten zeer ruw geschat als volgt verdeeld zijn:

Elektrisch gedeelte:	1,7 miljard gulden
Betonwerk	: 2,0 miljard gulden
Plaatsen	: 0,7 miljard gulden
Natte werken	: 2,0 miljard gulden
Diversen	: 0,5 miljard gulden
Totaal:	**6,9 miljard gulden**

Geval II uit de bovenstaande tabel is als alternatief echter reëler te achten. De kosten per geïnstalleerde KW worden in dat geval f 9675.
Indien een gemiddeld getijverschil te Yerseke nagestreefd wordt van 2,30 m kan de energieproductie 1243 miljoen KWh per jaar bedragen.
Als de renteverliezen tijdens de bouw worden verwaarloosd en de afschrijvingsduur van het gehele complex op 50 jaar gesteld, tegen 8% per jaar gedurende de gehele afschrijvingsperiode, dan wordt de KWh-prijs tenminste f 0,47.
Laten we verder aannemen dat op de stichtingskosten van de centrale, een bedrag van f 2,4 miljard in mindering kan worden gebracht, zijnde de stichtingskosten van een conventionele stormvloedkering in de mond van de Oosterschelde. Dit bedrag leiden we af uit één van de ontbindende voorwaarden, die de regering in november 1974 gesteld heeft met betrekking tot de toelaatbare meerkosten van het gehele nieuwe werk in vergelijking met het oude. Het kunstwerk is hiervan slechts een onderdeel, maar zodanig groot dat van het stichtingskapitaal ad f 7,1 miljard van de getijcentrale toch f 2,4 miljard ten laste van de Deltawerken kan worden

570

geboekt. Dan resteert een voor de getijcentrale in rekening te brengen beginkapitaal van f 4,7 miljard. In dit geval dient de KWh-prijs tenminste f 0,31 te zijn.
De huidige prijs van gemoduleerde energie van grootverbruikers gaat de 8 cent/KWh niet te boven; en als een grootverbruiker energie afneemt die met het getij varieert en waarvan de maxima ook 's nachts vallen, kan de prijs niet hoger liggen dan 7 cent.
In onze verkenning is ook geen rekening gehouden met de inflatie; daarom kan de prijs van f 0,31/KWh slechts worden beschouwd als een globale indicatie van de minimum haalbare prijs gedurende het eerste bedrijfsjaar.
De prijzen zullen vervolgens steeds bijgesteld moeten worden. Lagere prijzen zullen alleen kunnen worden bereikt wanneer de rentepercentages aanzienlijk dalen en de inflatie tot stilstand is gekomen.
De jaarlijkse exploitatie- en onderhoudskosten en de investeringskosten van de minimaal vereiste 10 % reservecapaciteit, die we tot nu toe buiten beschouwing hebben gelaten, zullen ook hun effect hebben op de prijs per KWh; naar alle waarschijnlijkheid zullen ze tenminste een verhoging veroorzaken van 15 %, zodat de schatting van de KWh-prijs neerkomt op f 0,35, gerekend naar het prijspeil van 1974.
De prijsverhouding tussen de huidige grootverbruikersprijs en de berekende prijs is dus zelfs bij deze waarschijnlijk te lage schattingen 1 : 5.
Wordt het getijverschil te Yerseke opgevoerd tot 2,60 m, dan bedraagt de energie-opbrengst jaarlijks slechts 844 miljoen KWh, 68 % van de opbrengst die men haalt met 2,30 m getijverschil te Yerseke. Het maximale debiet zal echter 71000 m^3/sec. moeten bedragen, zodat de turbines 1,3 maal zoveel debiet zullen moeten kunnen doorlaten als in het eerder berekende geval.
De kosten van de energie zullen daardoor minstens 50 % hoger komen te liggen. Het heeft derhalve geen zin, deze variant verder door te rekenen.
De prijsverhouding van 5 : 1 die we moesten vaststellen tussen getij-energie en thermische energie geeft al overtuigend aan, dat een getijcentrale in de mond van de Oosterschelde energie zou produceren op een economisch niet rendabele wijze, zeker op korte termijn. Uit een omgekeerde redenering blijkt hetzelfde.
Gaan we uit van een haalbare prijs van 7 ct/KWh voor met het getij fluctuerende energie, en van de eerdergenoemde jaarproductie van 1243 miljoen KWh, dan zal een centrale alleen rendabel zijn als de jaarlasten lager zijn dan 87 miljoen gulden. Dit betekent dat een getijcentrale aan investering zeker niet meer dan 1 miljard gulden mag kosten. Dit bedrag wordt met een factor 4 à 5 overschreden; ook langs deze weg blijkt dat een getijcentrale, in de mond van de Oosterschelde, die een groot gedeelte van het getij moet doorlaten, economisch niet haalbaar is.

571

3.3 PAO Course Energy Hydraulic Engineering

ir. D. Kooman - Rijkswaterstaat Deltadienst.

College Energie waterbouwkunde

Principe en ontwerp van getijcentrales

Enige historie.

Getijenergie is een fenomeen waardoor de mensen sinds eeuwen gefascineerd zijn. Talloos zijn de inspanningen die men zich getroost heeft om deze vorm van energie voor toepassing in de samenleving geschikt te maken. Reeds in de middeleeuwen zijn " getijmolens " ontwikkeld die, evenals dat met gewone water-molens het geval is, een aanwezig verschil in waterstand omzetten in mechanische energie. Deze mechanische energie, meestal m.b.v. een schoepenrad opgewekt, werd gebruikt voor de aandrijving van allerhande werktuigen. Hoofdzakelijk daar waar van een redelijk getijversch sprake is, heeft de toepassing van een getijmolen zin, vanwege de lage rendementen bij geringe vervallen en daardoor de korte tijdsduur die per getij beschikbaar is voor de produktie van energie.
Getijmolens werden (en worden) dan ook vooral aan de landinwaardse zijde van estuaria aangetroffen, waar de getijverschillen het grootst zijn.
Zo waren in vroeger tijden grote aantallen getijmolens te vinden in de omgeving van Bergen op Zoom en het Oostelijk deel van de Westerschelde.
Plannen om getijenergie om te zetten in transportabele c.q. elektrische energie, worden sinds ongeveer 100 jaar serieus bestudeerd. Enige Nederlandse voorbeelden zijn een getijcentrale ten behoeve van de bediening van de derde schutsluis te Hansweert, waarvan de realisatie onmogelijk gemaakt is door de eerste wereld-oorlog als gevolg waarvan de reeds bestelde waterturbine en een z.g. hydropulsor (beide van Duits fabrikaat), niet geleverd konden worden (1). Een ander plan betreft een bekken met getijcentrale

ter hoogte van het " Land van Saeftinghe " uit ca. 1930. Daarna is nog, in opdracht van de Deltacommissie (1954), een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van energiewinning binnen het kader van het Deltaplan [2] . Tenslotte is in de studieperiode naar de afsluiting van de Oosterschelde (1975) een studie uitgevoerd naar de mogelijkheid de z.g. afsluitbare stormstuwcaissondam als een getijcentrale uit te voeren [3]. Ook de 8 jaar eerder uitgevoerde studie, die op de mogelijkheden die de Oosterschelde terzake biedt, betrekking had en uitgevoerd werd door de Provinciale Zeeuwse Electriciteits-Maatschappij (1967), verdient vermelding. [4]

In het buitenland zijn vele studies uitgevoerd. Het is opmerkelijk hoe vasthoudend de ontwerpers van getijenergiesystemen zijn. Studies die hedentendage worden uitgevoerd over de mogelijkheden die estuaria bieden zoals Passamaquody en Fundy Bay (VS/Canada), Cook Inlet (Alaska), San José (Argentinië), Severn (Engeland), vinden allemaal hun basis in studies die een halve eeuw geleden of zelfs meer, ook al zijn uitgevoerd. De technische ontwikkelingen, vooral op het gebied van de waterturbines en de stijgende energieprijzen zijn, naast de obsessies van ontwerpers en bestuurders, oorzaak van het voortdurend in heroverweging nemen van eerder ontworpen plannen.
Tot nu toe zijn er slechts 2 getijcentrales in operationeel bedrijf. De grootste daarvan is de " Rance " centrale bij St-Malo (Bretagne, Frankrijk) in bedrijf gesteld in 1966 (fig. 5). Het gemiddelde verval bedraagt hier 8,2 m. De centrale bestaat uit een turbine - gebouw waarin 24 eenheden met een totaalvermogen van 240 MW staan opgesteld, een stelsel van in- en uitlaatsluizen met de nodige afsluitende dijkwerken.De jaarlijkse produktie bedraagt 610 Gwh. Voor het pompbedrijf (indien gebruikt) is jaarlijks 65 Gwh nodig, zodat de netto-produktie 545 Gwh bedraagt.

De tweede operationele centrale is de Russische Kislaya baai (Witte zee) proefcentrale, werkend onder een gemiddeld verval van 3,3 m met een geinstalleerd vermogen van 400 kW (één eenheid), uitgevoerd als een drijvend caisson en afgezonken ter bestemder plaatse. (1968)

In uitvoering is een proefprojekt in een zijrivier (Annapolis River) van Fundy Bay in Canada met als doelen het verkrijgen van ervaring in de operationele bedrijfsvoering, het testen van een nieuw turbinetype ("Straflo")alsook de toetsing van technische en economische modellen, alvorens te besluiten tot grootschalige projekten in de orde van duizenden MW's. Het projekt omvat één turbineeenheid van 20MW, geplaatst in een bestaande afsluitdam. De in bedrijfsstelling wordt in de 2e helft van 1983 verwacht.

Principe getijcentrale.

Waterkracht.

Net zoals dat bij een riviercentrale het geval is, wordt bij een getijcentrale energie opgewekt door water, dat onder verval door een waterturbine stroomt. Dit stromende water brengt via een schoepenblad de as van de turbine in omwenteling, waardoor de aan deze as gekoppelde generator elektrische energie opwekt.

In tegenstelling tot de riviercentrale, is bij een getijcentrale de valhoogte van het water en daarmee het debiet door de turbine niet constant maar wordt bepaald door de getijbeweging ter plaatse.

De tijdsafhankelijkheid van debiet en verval veroorzaken in eerste instantie ook elektriciteitsprodukties die met de eb - en vloedbeweging mee variëren, hetgeen op zichzelf een ongelukkige manier van energieproduktie is. Riviercentrales hebben het grote voordeel dat via het creeëren van stuwmeren het verval aanzienlijk vergroot kan worden terwijl een vrijwel constante debietlevering gegarandeerd wordt. Bij een getijcentrale kan het verval zonder bijzondere constructies, waar later op wordt teruggekomen, nauwelijks vergroot worden.

Referenties.

(1) ir. J.A. Ringers
Rapporten en Mededelingen van den Rijkswaterstaat
nr 8 Alg. Landsdrukkerij 1917.

(2) ir. F.J. de Vos
Onderzoek naar de mogelijkheden voor energie-
winning uit de getijbeweging in de Zeeuwse wateren.
Nota SECRET. Delta-Commissie 1954.

(3) ir. D. Kooman
Getijcentrale Oosterschelde.
Nota W-75.060 Deltadienst, Waterloopkundige
afdeling 1975.

(4) P.Z.E.M.
Rapport betreffende de toepassing van een getij-centrale
in combinatie met de nog uit te voeren Delta-werken in
het Oosterscheldebekken.
P.Z.E.M. Middelburg 1967.

(5) D. Kooman
The Severn Tidal Barrage
Scheme Closure of the Estuary.
Severn Barrage Seminar 7 sept. 1977
Energy paper nr 27. Dept. of Energy.
Great Britain

(6) G. Maubossin
L'usine marémotrice de la Rance.
Tidal Power. Proc. Int.Conf. on Utilisation
of Tidal Power 1970.

(7) Tidal Energy - a world question with limited answers.
International Construction. nov. 1976.

(8) Proc. Intern. Symposium on Wave and Tidal Energy.
Canterburg, England 1978.

-19-

(9) H. Miller

Choise of Hydro-electric equipment for tidal energy
Korea Tidal Power Symposium
Scoul noc. 1978.

(10) Proc. Second intern. Symposium on Wave and Tidal Energy. Cambridge sept. 1981.

(11) Severn Barrage Symposium.
Inst. of Civ. Eng.
London oct. 1981.

3.4 Tidal stream potential

3.4.1 Eastern Scheldt

Ecofys and Torcado are planning to install Torcado Turbines in the Eastern Scheldt surge Barrier, see text box below. A business presentation[1] "As part of Tocardo's commercial demonstration project scheme, a feasibility study is being done on implementation of a 1 megawatt tidal energy plant in this sea defence. The Oosterschelde Phase I project aims to perform a feasibility study with conceptual design to develop 7 Tocardo Aqua 4500 units in a single sea defence opening. An Environmental Impact Assessment is part of the project. The total tidal energy potential of the Oosterschelde Sea Defence is estimated to be 70 MW+ when fully developed." The status of these plans is unknown at date of writing this report.

Ecofys (2000), Kansen voor energiewinning uit getijde in de Oosterschelde.

[1] http://www.tocardo.com/?download=Tocardo_business_presentation-v4e.pdf

This study has looked into the generation of tidal energy, both tidal stream and tidal range. Much information is included in the report. It also gives info on the different turbines which could be used for tidal stream energy.

At last the report mentions information on different stream turbines:
- Turbines with friction rotors. Principle of water mill;
- Turbines with axial rotors;
- Turbines with cross flow rotors.

And some examples of Dutch systems:
- Whale Tail Wheel;
- Worms turbine (in dutch also: Peddelturbine of Water Tol). Tests have been done with this concept at Delft Hydraulics (in 1985), result unknown, near Kornwerderzand, experiment failed due to unknown reasons, and more recently in Terneuzen (2000?), results unknown;
- Tocardo Turbine. This turbine is still being tested and more projects are coming up according to the business review of the Tocardo company.

PZC 8 Mei 2009
(http://www.pzc.nl/regio/bevelandentholen/4938822/Energie-uit-Oosterscheldekering.ece)

NEELTJE JANS - Het opwekken van elektriciteit met behulp van de stroming in de Oosterscheldekering lijkt eindelijk van de grond te komen. Twee bedrijven, Ecofys en Tocardo Tidal Energy, hebben serieuze belangstelling voor het plaatsen van onderwatermolens in enkele openingen van de stormvloedkering. Tocardo-directeur Hans van Breugel ziet grote mogelijkheden voor het opwekken van getijdenenergie in de monding van de Oosterschelde. Hij wil ook snel aan de slag. Volgend jaar zomer moeten zes onderwatermolens in de kering worden geplaatst. Het gaat om een type onderwatermolen dat Tocardo eerder heeft beproefd in de Afsluitdijk. De molen ziet eruit als een gewone windmolen met twee bladen. Het andere bedrijf dat belangstelling heeft voor de kering, Ecofys, is nog niet zover als Tocardo. Ecofys heeft een nieuwe getijdencentrale ontwikkeld, die energie kan opwekken uit zowel getijstroming als golfbeweging. Een proefopstelling van deze getijdencentrale is onlangs geplaatst aan de Total-steiger in de Westerschelde bij Borssele. Die wordt het komende jaar getest. Van Breugel is al bezig met een vergunning voor het plaatsen van zijn molens. Rijkswaterstaat Zeeland staat er welwillend tegenover. De hoofdvraag is welk effect de molens hebben op de doorlaatbaarheid van de kering. Het is voor de Oosterschelde belangrijk dat zoveel mogelijk water blijft in- en uitstromen. Het bedrijf Ecofys heeft dit in 2000 onderzocht voor de provincie. Een conclusie was: 'energieopwekking uit getijdenstroming op grote schaal is strijdig met het beleidsplan Oosterschelde'. Ecofys zag wel kansen voor kleinschalige energieopwekking. "De overheid moet het dan ook financieel mogelijk maken getijdenenergie te ontwikkelen", stelt Peter Scheijgrond van Ecofys. Het ministerie van EZ wil 'slechts' 12,5 eurocent vergoeden per kilowattuur opgewekte getijdenstroom. De sector vraagt 37 eurocent, omdat getijdenenergie (nog) hoge ontwikkelingkosten vergt. De proef bij Borssele krijgt geen vervolg, als een betere regeling uitblijft, zegt Scheijgrond. Van Breugel hoopt op investeringssubsidies voor zijn molens in de kering.

3.4.2 Afsluitdijk

(Internet) information about experiments of Torcado.
The company Torcado did 2 tests in the Afsluitdijk:
- Proof of product in 2005;
- Endurance test in 2008 to 2015.

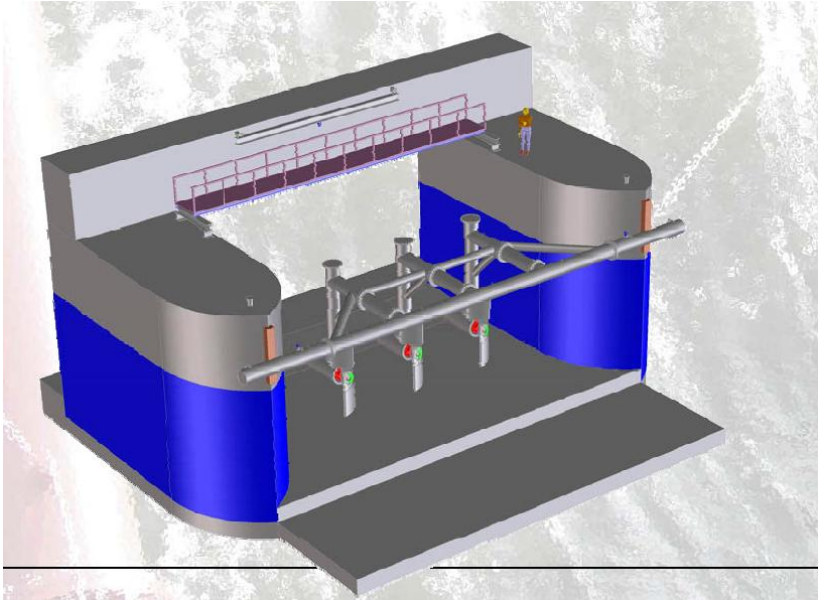
The following information has been retrieved from the Web based on a company presentation of Torcado[2]:

In 2005, one Tocardo 2800 unit (35 kW max) was successfully tested at the Afsluitdijk discharge sluices at Den Oever, NL. The unit was connected to the existing sluice construction with a support structure. These tests provided the proof of product for the Tocardo Technology. Prototype Turbine Features:

- Rotor blades diameter 2.8 m;
- Gearbox & asynchronous generator;
- State of the art power electronics & control;
- Max water velocity 4,9 m/s, max during tests 3,8 m/s;
- Max force on rotor 6 tonnes (during tests 3,6 tonnes);
- Tests were performed full-time grid connected;
- Max. electrical power during tests 33 kW;
- Average production 50 kWh per tide for one turbine.

The sluices at Den Oever at which the experiment is seen well.

[2] http://www.tocardo.com/?download=Tocardo_business_presentation-v4e.pdf



3D view of the experiment set-up.

Three Tocardo 2800 units (35 kW max per unit) are to be demonstrated on the same location as
previous tests; at the Afsluitdijk discharge sluices at Den Oever. The demo will start with one single unit in 2008.

- This time, the units will be pre-production models, using the same direct drive technology as in future commercial types;
- During the demo, which will run 3 to 10 years, clean power will be delivered to the power grid. Pre-Production Turbine Features;
- Max power 40kW @3.5 m/s;
- Rotor blades diameter 2.8 m;
- A total annual energy production of 120.000 kWh is expected (40.000 kWh per turbine).

3.4.3 Waddenzee

Although the area is ecological very vulnerable, especially the tidal inlets have potential for tidal stream energy. In the major inlets, the tide flows in and out of the Wadden Sea with an approximate speed of 1.5m/s over a significant cross section. This would also connect well to the ambition of the Wadden Islands to be energy neutral in 2020.

The Marsdiep inlet in between Texel and Wieringen is the largest tidal inlet of the Wadden Sea. This location has been investigated for tidal energy (see box below). As far as information goes, the permission for installation of the experimental tidal facility was not granted.

Toch getijdencentrale in de Waddenzee

Woensdag 12 november 2008

De regering wil toch meewerken aan de realisering van een getijdenenergiecentrale in de Waddenzee. Die bevestiging hebben burgemeester en wethouders deze week gehad van minister Cramer van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Tot op heden was zo'n centrale niet mogelijk, omdat de Planologische Kern Beslissing bouwwerken in de Waddenzee verbiedt.

Gezien het belang dat de minister hecht aan het onderzoek naar groene energiebronnen doet zij een voorstel om de wet hierop aan te passen. De gemeente had bij Cramer het verzoek ingediend om een getijdenenergiecentrale mogelijk te maken in de Waddenzee. Het streven is de centrale in 2010 operationeel te laten zijn.

Getijdenenergie kan een belangrijke bijdrage leveren aan de doelstelling van de Waddeneilanden om in 2020 duurzaam in de energiebehoefte te voorzien. De gemeente heeft vorig jaar een aanvraag bjj het Waddenfonds ingediend voor de eerste fase van een 5 Megawatt centrale. Deze aanvraag is gehonoreerd. In september 2008 is bij het Waddenfonds een aanvraag ingediend voor een proefinstallatie in fase 2. In mei 2009 wordt bekend of deze subsidie wordt toegekend.

De proefinstallatie houdt in dat er in de Waddenzee een ponton wordt geplaatst met een zestal turbines. Deze turbines wekken in totaal maximaal 500 kilowatt op. Het geheel wordt voor de haven van het NIOZ verankerd.

Bron: www.texelsecourant.nl gepubliceerd op Woensdag 12 november 2008.

4 ANNEX D: RESULTS FROM THE INTERVIEWS

4.1 Interview with Roger Morris

Interviewee:	Roger Morris	**Organisation:**	Natural England
Date:	1st September 2009	**Tel:**	++44(0) 300 060 0623
Interviewer:	Nick Cooper	**Organisation:**	Royal Haskoning

1) Introduction of the Expert

Roger Morris is a Senior Policy Specialist in Ports & Estuaries within Natural England's Policy Team. Natural England is the UK government's statutory advisor on nature conservation and landscape issues in England. He has taken particular interest in geomorphological issues in estuaries and their implications on nature conservation and geological conservation. He has several published and 'in press' papers on the impact of tidal energy barrages on estuaries, based upon findings from his work in applying 'regime model theory' and 'expert geomorphological analysis' to barrage proposals on the Severn Estuary, and from discussions and field visits to existing tidal range energy barrages (such as Annapolis Royal in Canada) and analogue storm surge or amenity barrages (such as the Oosterschelde in the Netherlands and the Wansbeck in Northumberland, England).

2) Specific Project Issues

<u>Severn Barrage</u>

- Sir Herman Bondi Commission in 1981 – led to considerable interest and investigation into a barrage on the Severn.
- Abandoned in the 1990s when considered prohibitively expensive.
- Re-visited interest in more recent times due to concerns about climate change.
- Two separate groups (Severn Tidal Power Group and Severn Lake) are pursuing interest in a scheme along a line from Lavernock Point to Brean Down (known as the 'Cardiff-Weston' barrage).
- Environmental impacts have been downplayed in previous reports and studies.
- Some purported environmental benefits stated in previous reports are open to question.

<u>Previous assessments of physical impacts of the Severn Barrage</u>

- Severn Tidal Power Group (STPG) studies:
    - **Reduction in tidal heights** of ~0.5m immediately upstream of the barrage, rising to reductions of ~1.0m at Avonmouth and reductions of ~1.5m at Sharpness
    - **Reduction in tidal range**, from 12m at present to ~5m at Avonmouth and from 11m at present to 4.5m between the barrage and Cardiff
    - **Rise in low water level elevation** of 6m at Avonmouth due to impoundment
    - **Reduction in levels of suspended sediment** within the estuary by as much as 85%
    - **High water stand times extended** across the tidal cycle
    - **Reduction in extent of inter-tidal habitat** by 76% on spring tides and 59% on neap tides
    - The reduction in levels of suspended sediment and **greater relative freshwater influence** were purported by STPG to have positive environmental effects (reduced turbidity leading to increased productivity,

improved oxygen carrying capacity, increased biomass and more species-rich assemblages) but Roger Morris pointed out that in a naturally functioning estuary system, suspended sediments would be deposited on the inter-tidal areas of the upper estuary, allowing the estuary to keep pace with sea level rise. There is consequently a geomorphological implication that hitherto has not adequately been addressed.

- Roger Morris' studies:
    - Using techniques developed and reported in EMPHASYS (Estuary Morphology and Processes Holistic Assessment SYStem) as part of the UK government's Defra and Environment Agency joint R&D programme, both 'regime modelling' (in association with Professor John Pethick) and 'Expert Geomorphological Assessment' (EGA) were applied.
    - Under existing conditions, assuming a tidal prism of 6 x 10^9 m^3, the regime model showed that the Severn was approximately in regime with a predicted mouth width of 15.7km (compared with actual value of 15.6km)
    - The regime model showed that adjustment of the estuary to the tidal conditions imposed by the barrage would necessitate a **volumetric decrease of 5.2 x 10^9 m^3**, mostly due to **sub-tidal deposition**.
    - Based on present estimates of annual sediment availability, such deposition would take place over **many centuries** until the new regime form is reached.
    - Through comparison with the Oosterschelde (see below) via information provided by Rijkswaterstaat it was anticipated that there will be **considerable sediment re-distribution**.
    - In high areas of mud flat there would be **wind-generated wave action** which will cause erosion.
    - There will be a **shortfall in fine sediment supply** from upstream of the barrage to Bridgwater Bay (downstream) and **changes in the larger-scale circulation of sediment**
    - There would be **significant ecological changes** associated with these geomorphological changes.

Oosterschelde

- Storm surge barrier constructed 1983 – 1987.
- Details should be well known by Dutch colleagues within Royal Haskoning.
- Well studies and reported, including pre- and post-construction monitoring and peer reviewed literature.
- Although a different purpose (storm surge protection) the barrier has not dissimilar geomorphological implications to a tidal power barrage.
- In particular, the principal implications have been reduction in tidal range and changes to sediment pathways.

La Rance

- Well cited in published literature and consequently frequently used to support positive environmental messages **but …**
    - No pre-construction baseline;
    - Ria (steep sides) estuary form, predominantly sandy environment, and low suspended sediment concentrations do not make it a good analogue for UK.

Annopolis Royal, Bay of Fundy

- Poorly represented in published literature.

- Similar responses to Oosterschelde seem to have occurred, based on discussions with staff from Acadia University (Nova Scotia) and Clean Annapolis Restoration Project (CARP) and a field visit by Roger Morris.
- The Annapolis River system sediment budget is fluvially dominated, so the downstream erosion effects are at least in part due to disruption of these sediment supplies (c/f Severn and Oosterschelde which are largely marine driven).

3) Broader Perspective: Lessons for the Netherlands

- There is renewed interest in tidal range energy in the UK due to:
    - Increased focus on renewable energy sources;
    - Substantial tidal resource;
    - Greater predictability and consistency of supply than other existing renewable energy sources (e.g. wind).

- Much debate in the UK has focused on possible ecological and water quality implications (both positive and negative) of proposed barrages and lagoons, especially with respect to implications for migratory birds. However, reliable assessment of these implications is critically dependent upon interpretation of geomorphological evolution following barrage construction.

- With respect to geomorphological aspects, the form of an estuary is directly related to the levels of energy imparted upon it. If there are changes in energy then the estuary will respond, or try to respond. There are numerous analogues for this – including the Dee Estuary in north-west England which has experienced considerable in-filling following foreshortening due to canalization and the Wansbeck estuary in north-east England which has experienced siltation following construction of an amenity (lake impoundment) barrage.

- The critical relationship that emerges from analogues with other schemes (both tidal energy barrages and other forms of structure such as storm surge barriers and amenity barrages) is between sub-tidal deposition environments and the effects of wind-driven wave erosion within the inter-tidal zone.

- Erosion by wind-driven waves leads to sediment suspension and subsequent deposition in deeper sub-tidal water where reduced tidal propagation also limits re-mobilisation that is needed to return sediment onto the inter-tidal environments during sediment-building phases.

- In summary, geomorphological implications of barrage schemes have not adequately been addressed, particularly in relation to impacts on salt marshes and mud flats (including changes in tidal range and changes in suspended sediment supply to these areas) and impacts on geological conservation (e.g. submergence of features, impeded access to view features, direct impacts of engineering works). There is greater need for ‘top-down’ geomorphological approaches (such as those reported in EMPHASYS) to be employed at an earlier stage on schemes so that the longer-term geomorphological implications can be more readily assessed. Such approaches should be used to (1) develop a conceptual understanding of the estuary system and (2) assess how it will respond to the perturbation introduced by construction of a barrage.

- Considering broader issues, the principal reason that schemes have not gone ahead to date in the UK is considered to be cost. Despite the adverse environmental impacts there are also benefits to these schemes and if the will of government was present, these issues would be overcome or accepted as unavoidable impacts. Most major capital projects are, however, beyond the ability of even the biggest companies (and marine construction projects have high risk) and government concessions would be necessary to assist.

- There is a need for more consideration of the impacts from other analogue schemes, particularly greater international involvement and publication of literature. A useful contact here was identified as Carl Amos, who has worked on some Canadian schemes.

- There is perhaps more need to also consider implication on the following topics: geomorphology (particularly top-down approaches such as regime modelling and EGA), floating debris (causing blockages and operational downtime), water quality (shifts in salinity gradients, implications for diffuse pollution) and fish (species and population age distributions).

4.2 Interview with Professor Falconer

Interviewee:	Prof. Falconer	**Organisation:**	Cardiff University
Date:	September, 4 2009	**Tel:**	
Interviewer:	Bas Jonkman	**Organisation:**	Royal Haskoning

Any views expressed in this interview are personal and not those of the university or other organizations

1) Introduction
   - Introduction of the expert: personal background and description of experience related to tidal energy projects and role in tidal energy.

   Prof. Roger Falconer is Halcrow professor water management at Cardiff University. He has a background in computer modelling of flows and water quality and 30 years of research experience. More recently he has been involved in applying this research to tidal energy projects and promoting tidal energy projects to several audiences (specialists, international, IAHR, general public groups, etc.). He is a member of the UK experts panel on Severn tidal power studies and chair of the marine energy task group in Wales (incl. tidal stream). His current research focuses on tidal stream turbines, tidal lagoons and tidal barrages.

   The Severn barrage is of international interest, he is invited to give talks and interviews on that project internationally several times a week. On average he gives 1-2 talks a week.

   A model tidal stream turbine has been developed and tested at Cardiff University. It is a vertical axis turbine and it has the advantage that its use is not depth limited.

   Wales has a lot of interest in the development of tidal energy, not just in the Severn estuary, but also tidal stream at the coast, and lagoons (off shore or attached). Wales wants to develop tidal technology in various forms along West coast.

His group at the university is doing computer modelling but also physical modelling of Severn estuary has been built. About 4 lecturers 3 postdocs and 20 research students are working on these topics.

2) Specific project issues
   - What are the crucial issues that determine the feasibility and realization of the tidal energy project?

Firstly, prof. Falconer gives a general introduction and a comparative discussion on different techniques.

Tidal stream turbines
There is doubt on the need for a barrage and many people like the idea of tidal stream turbines. People don't realize the size of the tidal stream turbines. Only large diameters are economically feasible.

The typical size is 20m in diameter. As 5m freeboard is needed on both sides, the minimum depth that allows use of these turbines equals 30m. In addition currents of at least 2 m/s are needed . Therefore there is limited availability of suitable sites in Severn estuary (or elsewhere). Stream turbines are often not viable (due to depth, currents requirements). This is less well understood by professionals and public. To generate a substantial amount of energy, thousands of turbines are needed and this will have an impact on the aquatic environment.

The Public is generally attracted to tidal stream (not visible). However education and information are needed on the above issues.

Off-shore lagoons
Another technique that has a lot of interest are off-shore lagoons. Novel techniques are proposed to minimize costs. These techniques look attractive in terms of cost. However:
- The Power yield is proportional to the size / surface. You need a large length of embankments.
- A barrage scheme needs less dam / embankment length than a lagoon to generate the same amount of energy-> barrage more attractive from an economic point of view.
- An example for the Severn: 144 km out 160km perimeter of the basin is natural coastline, the rest is barrage.
- There are opportunities for smaller lagoons. But cost effectiveness is main issue
- Lagoons are perceived to have minimal environmental impact. They are built in shallow water and therefore the environmental impact can be considerable.
- Lagoon type solutions can lead to complex flows in the lagoon and high levels of siltation.
- In general a lagoon attached to the coast would be preferable -> use natural coastline and added benefit of coastal defence.
- 2 out of 5 proposed schemes for Severn involve lagoons.

Tidal fence technique:
This is semi barrage with tidal current turbines in it. The structure is designed in such a way that water is guided to the turbines. To maximize energy, the gaps in the fence have to be as small as possible. Then you get high currents and this will lead to problems for navigation and siltation, morphology.

Introduction to the Severn Barrage:
Prof. Falconer summarizes some main characteristics of the barrage and the estuary

- The barrage was first proposed 1849 as railway barrage. It has been considered over last 80 years.
- 3rd tidal range in the world (14m spring tide).
- The barrage length is 16km and it runs from Lavenok point (5 km SW of Cardiff) to a location 5 km Southwest of Weston-Super-Mare.
- It would be able to generate 5% of the electricity in the UK.
- The cost would be around 20 Billion GBP.
- It would take an estimated 30 years to break even and het return on investment
- Proposed scheme includes: 216 turbines 40 MW each, 166 sluices, Shiplocks, road
- It will be constructed out of prefabricated caissons.
- Operated by Severn tidal power group.
- Ebb tide generation only.
- Tidal range upstream would be reduced from 14m to 7m.
- Current conditions: 14m (spring), neap (7m) and high levels of suspended sediment: 30 million tons (spring) 4 million (neap)

Issues
A big problem concerns the high levels of sediment that would be dramatically decreased by barrage -> more light penetration -> oxygen levels would increase
loss of intertidal mudflats 14,000 ha.
Major environmental concern is the loss of upstream intertidal habitats. Upstream tidal range would still be 7m (large by international standards).

The barrage will lead to reduced tidal currents, reduced suspended sediment levels, increased light penetration, increased dissolved oxygen, big change in biodiversity. Increased productivity.

Studies at Cardiff suggest to look at two way generation, instead of 1 way. It would generate electricity over a longer period of the day and enable protection of existing tidal regime

In general, a barrage would reduce flood risk upstream and downstream (to a lesser extent)

Crucial issues

- Loss of intertidal habitats.
- High flow energy and high tidal levels make the estuary unique. Changing this raises many issues
- The area is protected by EU regulations
- Several rare birds: would be lost
- River Severn is a migratory river (salmon, and other types). Structure would affect fish population and migration.
- Costs are a concern. Many people believe that there a better investments. It is noted that the government is not expected to invest in the barrage and private investors are expected to participate in the barrage project.
- The barrage would bring a lot of development (housing, airports, tourism). To some this is a major concern

- There is a lot of opposition from groups from other estuaries. They fear that if this barrage is built all the other estuaries will get barrages.

  There is also a lot support, even from some environmental groups. They are supporting idea of sustainable energy generation while aiming to minimize the impact.

- At this moment what are the main limitations for the further development and realization of the tidal energy project? How can you prioritize these issues?
- Most important are the environmental issues!
- Sedimentation – siltation issues are often mentioned as high-priority (Prof. Falconer does not believe that this will happen – sedimentation in river is limited). Most of sediment is from the estuary.
- The way of operating the barrier (1 or 2 way) is not a big issue for the public, although this will affect the losses.

  Key issues: fish, birds, coastal erosion, sedimentation.

- (How) Can these barriers be tackled / overcome?
- 2 way tidal generation alleviates some of the issues. It could reduce intertidal habitat loss.
- Fish migration can be reduced by modern turbine design and fish passes and well designed sluice gates.
- Shoreline erosion is not expected to be a big problems.
- Flooding is less of a problem. Barrage would give massive flood defence in case of sea level rise (3m) to large areas.
- For other issues it is also a matter of accepting them.

Which parties should be involved? Who should do what?
- British government is handling this project well and all relevant parties have been involved from an early stage.
- This is not a party political issue. The large parties have a neutral position and await results of studies.
- There are expert panels in all relevant fields, e.g. modelling, environmental issues. The strategic environment committees include members of environmental groups.
- There are talks of bringing in international expertise (hydro environmental, fishn etc.)
- Several workshops covering all relevant topics are organized

The project is managed by the national government with inputs from regional governments (Wales, UK).

- Is further research and knowledge development necessary to improve the feasibility of tidal energy project? Focus on which fields or issues?

On the whole there is sufficient information to make (engineering) decisions

However, there are a number of fields that require more research: a) limited knowledge of fish migration and interaction between fish and turbines; b) dynamic interaction sediment – water quality; bio kinetic processes c) ground water effects
In a later stage mitigation measures could be taken based on knowledge that is developed during the project.

- Do you have suggestions for key information sources (reports, websites, experts)

Papers by Cardiff university and experts The DACC government website.

Some final remarks on the Severn:
Next year is a new point for decision making: do nothing or go ahead with one of the 5 schemes. There is a lot of international attention for this project. Radio interviews etc. Also investors approach prof. Falconer with questions about issues such as siltation.

3) Broader perspective: lessons for the Netherlands
In the Netherlands the development of tidal energy is starting more or less “starting from scratch”. In this part of the interview we ask the expert for his or her advice to the Netherlands. It is noted that tidal differences in the Netherlands are lower than in the UK. Therefore the energy yields will be lower than in the UK and the costs of tidal energy generation are expected to be higher.

- Which general recommendations, based on your (personal) project experience, could give to us that are relevant in the investigation and realization of tidal energy projects in the Netherlands?

- In general tidal energy is not so attractive in the Netherlands as in the UK because of tidal conditions
- It is positive sign that NL is looking at tidal energy

Lessons and suggestions:
- Involve all stakeholders. Bring in the pressure groups from an early stage and have a healthy debate!
- Bringing in experts who have (technical) credibility and a proven track record and strong technical expertise. Also international expertise.
- From the start: study environmental issues and involve the public. Environmental issues are of large concern to the general public.
- Another issues that is often raised during the talks of professor Falconer is the business perspective. How will the project contribute to generation of jobs and business opportunities, e.g. in the field of tourism,

5 ANNEX E: RESULTATEN VAN DE BIJEENKOMST GETIJDE ENERGIE

[in Dutch]

5.1 Agenda Bijeenkomst Getijde Energie

Aan	:	Deelnemers
Van	:	Lucie Terwel, facilitator: 06- 22 79 40 21 Cathelijne van Haselen, projectleider: 06 27 88 12 17
Datum	:	Dinsdag 29 september 2009
Aanvang	:	10 uur
Plaats	:	Zaal 1, Royal Haskoning Rotterdam, George Hintzenweg 85, Rotterdam
Onze referentie	:	9V1913A0/A001/408165/SSOM/Rott
Betreft	**:**	Bijeenkomst Getijde Energie

Doelen bijeenkomst:

a. Toetsen of de “principal issues en lessons learnt” uit de UK juist en compleet zijn;
b. Gegeven deze “principal issues en lessons learnt”, nagaan wat de relevante aspecten zijn voor getijde energie in Nederland.

Agenda

Tijd	Agenda onderdeel
10.00 uur	Welkom en kennismaking (Cathelijne van Haselen en Lucie Terwel)
10.15 uur	Samenvatting van de cases in de UK en presentatie van de “principal issues en lessons learnt” (Bas Jonkman)
10.25 uur	Discussie over de “principal issues en lessons learnt”. Zijn ze compleet? Zijn ze juist? Welke zijn het meest van invloed op getijdenenergie in NL?
11.00 uur	Pauze
11.15 uur	Presentatie van de Nederlandse locaties (Leslie Mooyaart)
11.25 uur	Splitsen in twee groepen
	Beide groepen formuleren mogelijkheden om kansen te benutten en negatieve aspecten te verminderen. Waar en hoe zijn de ervaringen in de UK te gebruiken voor de Nederlandse situatie (kijkend naar de Nederlandse locaties)? Waarom wel/niet? Hoe moeten we daarmee omgaan? Welke stappen moet je nemen?
12.10 uur	Korte presentatie van de bevindingen van beide groepen. Vragen stellen en aanvullen door de twee groepen onderling.
12.30 uur	Plenaire beschouwing van het resultaat. Wat zijn de belangrijkste aspecten en hoe kunnen we daarmee omgaan in Nederland? Wat betekent dit in algemene zin voor de kansrijkheid van getijde energie in Nederland?
13.00 uur	Afronding en Lunch
	Einde

5.2 Deelnemers

Marcel Bruggers (Deltares); Projectleider van onderhavige studie. Marcel Bruggers trekt het project Energie uit Water. Hij is betrokken bij meerdere projecten binnen het WINN programma. Dit project valt ook binnen WINN.

Rob de Jong (Deltares). Betrokken bij een studie naar de mogelijkheden van (rivier)waterkracht in Nederland. Dit project valt onder WINN. Rob is sinds de jaren 80 betrokken bij waterkracht studies.

Paul Paulus (RWS Zeeland): Betrokken bij de verkenning naar het openzetten van de Brouwersdam ter verbetering van de waterkwaliteit. In deze verkenning wordt ook bekeken hoe ze getijde energie kunnen incorporeren.

Hans van Duivendijk: Geeft al 23 jaar de cursus water power engineering aan de TU Delft. Hij heet jaren bij Royal Haskoning gewerkt.

Peter van der Does: (Rijkswaterstaat; Dienst Infra): Werktuigbouwkundige. Hij trekt het “Zeker Duurzaam Programma” en is betrokken geweest bij het project naar de mogelijkheden van energiewinning uit sluizen en stuwen in Nederland.

Theo Prins (Deltares): Theo Prins heeft verschillende studies uitgevoerd naar de ecologische effecten van windparken op zee.

Leo Korving (Royal Haskoning): Leo Korving is betrokken bij duurzame energie projecten op het gebied van wind, zon en hydropower.

Bas Jonkman (Royal Haskoning en TU Delft): Bas Jonkman is werkzaam als universitair docent aan de TU Delft en werkzaam bij Royal Haskoning, met name op het gebied van hoogwaterrisico’s. Momenteel is hij in deeltijd gedetacheerd bij Ministerie van Verkeer en Waterstaat bij het directoraat generaal water in het kader van de ontwikkeling van het nieuwe waterveiligheidsbeleid

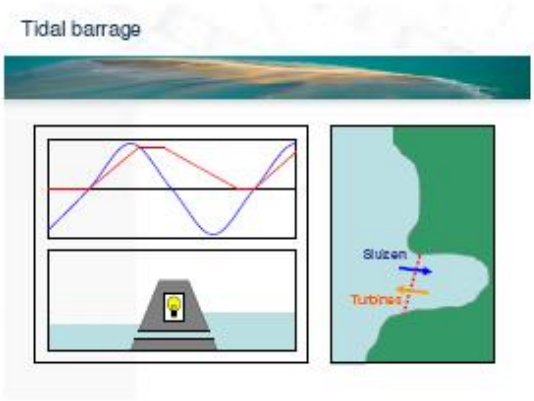
Henk Altink (Royal Haskoning): Afdeling Maritiem. Henk Altink heeft 25 jaar bij HBG gewerkt en in die hoedanigheid ook gedetacheerd geweest bij de Mersey Barrage.

Leslie Mooyaart (Royal Haskoning): Leslie is afgestudeerd aan de TU Delft op getijde energie en onlangs bij Royal Haskoning begonnen.

Lucie Terwel (Royal Haskoning): facilitator.

Cathelijne van Haselen (Royal Haskoning): Cathelijne van Haselen is projectleider van deze studie en betrokken bij meerdere initiatieven op het gebied van getijde energie.

5.3 Presentaties



Case Studies UK - Potentie

Case Studies UK - Locaties

Case Studies UK - Kengetallen Energie

Schema	Spring - eijverschil (m)	Opbrengst (GW h/jaar)	Vermogen (MW)	Kosten (miljoen pond)
Severn	10,5	17000	8640	15000
Mersey	8,0	1450	700	1500
Liverpool Bay	6,7	940	340	664
Duddon	5,8	210	100	413
Wyre	6,6	130	64	138
Loughor	3,9	15	5	23

Case Studies UK - Severn

- Studies vanaf 1920
- Verschillende alternatieven

- Enorme energieopbrengst (5% vraag UK)
- Economische impuls (werkgelegenheid, innovatie)
- Verminderd overstromingsrisico

Case Studies UK - Severn

- Hoge investeringskosten
  - 12 – 18 miljard pond
- Milieu effecten
  - Kwetsbaar gebied beschermt door European Habitats Directive, Birds Directive, Ramsar Convention
  - Afname areaal intergetijdengebied
  - Verwachte verandering in ecologie groot
  - Ecologische effecten onzeker

Case Studies UK - Mersey

- Studies vanaf 1980

- Opbrengst – 5% energiebehoefte van stad Liverpool
- Mogelijk wegverbinding
- Minder hoge investeringskosten (1,5 miljard pond)

Case Studies UK - Mersey

- Milieu effecten (vgl. Severn)
  - Vergelijkbare status gebied
  - Kleiner gebied, minder impact
- Hinder voor scheepvaart

Lessons Learnt

- UK heeft potentie voor toepassing van getij-energie met name door grote getijverschillen
- kWh-prijs bij Severn en Mersey vergelijkbaar met conventionele energiebronnen
- Techniek voor diverse werken en turbines beschikbaar
- Waarom nog niet toegepast?
  - Hoge investeringskosten
  - Grote milieu-impact; meest geschikte locaties voor getij-energie zijn vaak kwetsbare natuurgebieden

Lessons Learnt

- Betrek stakeholders in een vroege fase
- Gebruik expertise
- Kijk naar het economische effecten en haalbaarheid
  - Toename werkgelegenheid
  - Toerisme
  - Etc.
- Landschappelijke inpassing
- Milieu-effecten
  - *Accepteren (IROPI)*
  - *Bestuderen*
  - *Compenseren*

Getij-energie in Nederland
ROYAL HASKONING

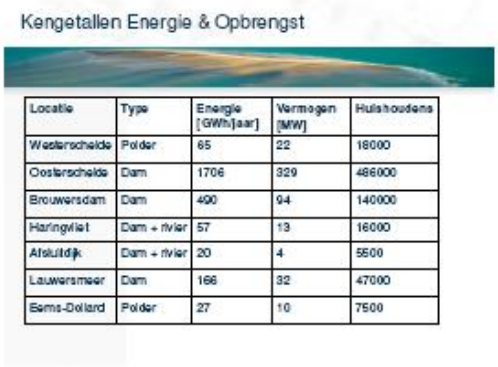
Inhoud
Geschiedenis
Aanpak
Locaties
Methoden
Kengetallen Energie & Opbrengst
Discussiepunten

Geschiedenis
Eerste getijmolen Zierikzee 1220 na Chr.
16 getijmolens in Schelde-estuarium
Begin 20e eeuw; plannen in Hansweert

Aanpak
Inventarisatie van mogelijkheden naar opwekking van getij-energie;
bestaande plannen
Tijverschil
energiepotentieel

Locaties
Haringvliet
- Tijverschil 2,3 meter
- Kierbesluit
Brouwersdam
Louwersmeer
- Tijverschil 2,5 meter
- Studie gaande
Studie uitgevoerd door RH
Afsluitdijk
Westerschelde
- Tijverschil 5 meter
- Ontpoldering
Oosterschelde

Intermezzo
Afsluitdijk
Brouwersdam



Kengetallen Energie & Opbrengst

Locatie	Type	Energie [GWh/jaar]	Vermogen [MW]	Huishoudens
Westerschelde	Polder	65	22	18000
Oosterschelde	Dam	1706	329	486000
Brouwersdam	Dam	490	94	140000
Haringvliet	Dam + rivier	57	13	16000
Afsluitdijk	Dam + rivier	20	4	5500
Lauwersmeer	Dam	166	32	47000
Eems-Dollard	Polder	27	10	7500

5.4 Workshop resultaten lessons learnt

5.4.1 Algemeen

Aan de hand van een interactieve sessie (geeltjes plakken) is gecheckt of de lessons learnt compleet zijn en / of de deelnemers aanvullingen hadden. De resultaten zijn hieronder afgebeeld, geordend in: 1) algemeen, 2) Economische aspecten en commerciële haalbaarheid, 3) overige economische aspecten en 4) milieu.

- Lessons Learnt op redelijk abstractieniveau. Graag specifieke lessen per studiegebied:
  - Succesfactoren;
  - Faalfactoren.
- Hoe ziet het “ideale” proces eruit? (hoe moet het proces ingericht worden met de grootste kans op slagen).
- Energiebeleid als hoofdbelang CO_2 doelstellingen?
- Rol van energiemaatschappijen?
- Hoe zorg je ervoor dat er geen politieke stellingname is/komt?
- In Nederland zullen partijen geen neutrale positie houden.
- Bijdrage EZ? Engeland?
- Praktijkervaring?
- Tekort aan kennis.

5.4.2 Economische aspecten en commerciële haalbaarheid

- Te veel nadruk op grote projecten die juist erg veel weerstand ontmoeten bij financiers.
- Er is weinig over tidal stream. Is daar ook info over? [Opmerking Cathelijne van Haselen: deze studie betreft “tidal range energy” en daar valt “tidal stream” niet onder.]
- Schatting van onderhoud in mariene milieu? (in. vgl. zoet milieu)
- Wat zijn de investeringskosten per MW?
- kWh-prijs vergelijkbaar met conventioneel alleen geldig voor grote schema’s.

5.4.3 Andere economische aspecten

- Economisch model om businessplan te maken, bepaalt kans van slagen
- Multifunctionaliteit gebruiken.
- Haalbaarheid met name door additionele factoren incl. spoor/ wegverbindingen/ werkgelegenheid/ toerisme.
- Meer zoeken naar kansen voor combinatie van functies.
- Getijcentrale als gemaal.

5.4.4 Milieu

- Hoe spelen de turbine-effecten mee in de beoordeling m.b.t. milieu?
- Waar is ecologische expertise beschikbaar?
- Keuze maken! (Gaan we voor duurzaam of niet?)
- Wijken de Lessons Learnt veel af van de mogelijke problemen in Nederland?
- Zoek innovatieve methoden, waardoor je minder effecten op intergetijde gebied hebt (niet compleet afsluiten estuaria).
- Afweging positieve milieueffecten (CO_2) tegen negatieve effecten op natuur
- Van welke wetten/regels kunnen we goed gebruik maken?
- Hoe zien oplossingsrichtingen voor milieueffecten eruit (ze zijn de grootste show-stoppers)?

5.4.5 Discussie

Tijdens de discussie worden een aantal “geeltjes” besproken. Hieronder worden enkele discussiepunten belicht:

- In de UK ligt de nadruk op grote projecten en deze leveren juist veel weerstand bij financiers. Aangeraden wordt om eerst te starten met kleinere pilot projecten. De kosten van dergelijke projecten zijn lager, brengen minder risico’s en maatschappelijke weerstand met zich mee.
- Het combineren van functies kan wel eens het belangrijkste aspect zijn ten aanzien van economische haalbaarheid. Meerdere dragers zijn noodzakelijk.
- Combinatie van functies: een belangrijk aspect in de haalbaarheid van een getij centrale is het combineren met andere functies. Het combineren van een dam met transport mogelijkheden (spoor/ weg), toerisme (informatie centrum getijde energie) en vergroot de haalbaarheid. Het realiseren van een getijde centrale levert een positieve stimulans op voor de werkgelegenheid.
  Daarnaast wordt opgemerkt dat er in de planstudie naar de Brouwersdam bekeken in hoeverre de getijcentrale kan worden ingezet als gemaal, als noodmaatregel met het oog op toekomstige klimaatveranderingen.

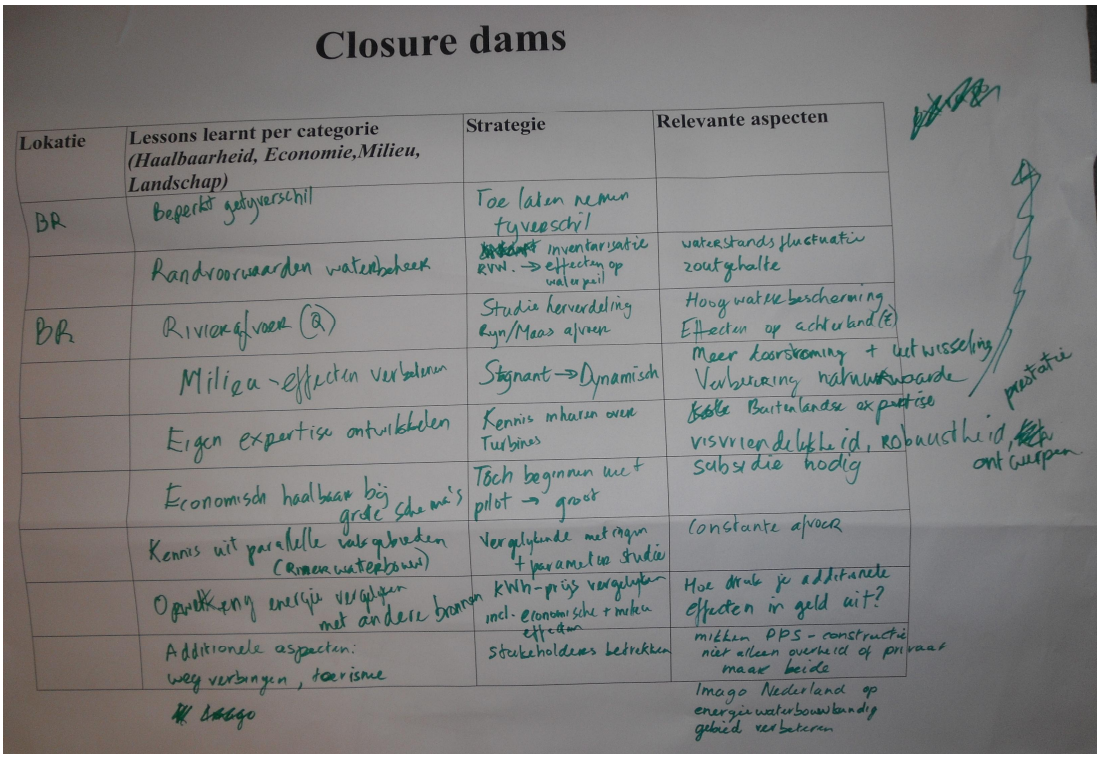
Bij het combineren van functies dient zoveel mogelijk te worden aangesloten bij (lopende) ontwikkelingen.

- De kosten en baten kunnen inzichtelijk worden gemaakt door ze beide in geld uit te drukken.
- Turbines. Rob de Jong vraagt wat de effecten zijn van verschillende turbines op o.a. vissen. Met name in Nederland kan dat een knelpunt zijn. Peter van der Does geeft aan dat o.a. Caplan over de afgelopen jaren haar turbines heeft verbeterd en dat ze minder vis onvriendelijk zijn. De grote turbine fabrikanten beseffen wel degelijk dat dit een belangrijk aspect is.
  In Nederland is de kennis ten aanzien van werktuigbouw in de waterbouwkunde gering. Kennis is beschikbaar bij enkele organisaties, o.a. in Oostenrijk en Frankrijk. Royal Haskoning heeft onlangs een rapport opgeleverd aan
  Rob de Jong waarin alle verschillende turbines op een rij zijn gezet.
- CO2. In de UK zijn de subsidies afhankelijk van de CO2 terugverdientijd, carbon payback. Relevant aspect is hoe de berekening wordt gemaakt, afschrijving over 8, 15 of 30 jaar? Marcel Bruggers geeft aan dat ze bij Ecofys net een studie hebben uitgezet waarnaar wordt gekeken naar de CO2 terugverdientijd.
- Wetten en Regels: hoe zouden de huidige wetten en regels kunnen worden gebruikt om zaken te bespoedigen en subsidies te verkrijgen?

5.4.6 Resultaten groepsessie

Group 1 *Closure Dams*

Lessons Learnt	**Strategie**	**Relevante Aspecten**
Beperkt getijverschil	Toe laten nemen tijverschil	
Randvoorwaarden waterbeheer	Inventarisatie randvoorwaarden → effecten op waterpeil	Waterstandsfluctuatie zoutgehalte
Rivierafvoer	Studie herverdeling Rijn/Maas afvoer	Hoogwaterbescherming Effecten op achterland (€)
Milieueffecten verbeteren	Stagnant naar Dynamisch	Meer doorstroming, uitwisseling, verbetering natuurwaarde
Eigen expertise ontwikkelen	Kennis inhuren over turbines	Buitenlandse expertise, visvriendelijkheid, robuustheid, prestatie, ontwerpen
Economisch haalbaar bij grote schema's	Toch beginnen met pilot, om naar groot toe te gaan	Subsidie nodig
Kennis uit parallelle vakgebieden (rivierwaterbouw)	Vergelijkende parameter studie	Constante afvoer
Opwekking energie vergelijken met andere bronnen	kWh-prijs vergelijken incl. economische + milieueffecten	Hoe druk je additionele effecten in geld uit?
Additionele aspecten: Wegverbinding, toerisme	Stakeholders betrekken	Mikken PPS-constructie, niet alleen overheid of privaat maar beide
		Imago Nederland op energiewaterbouwkundig gebied verbeteren

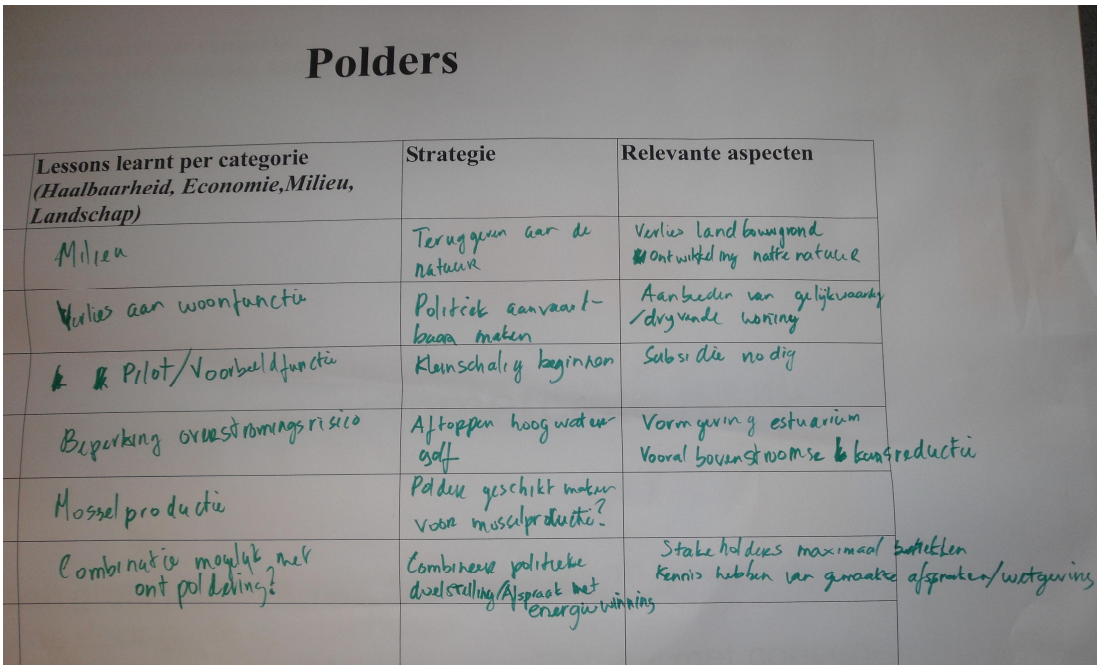


Closure dams

Lokatie	Lessons learnt per categorie (Haalbaarheid, Economie, Milieu, Landschap)	Strategie	Relevante aspecten
BR	Beperkt getijverschil	Toe laten nemen tijverschil	
	Randvoorwaarden waterbeheer	Inventarisatie RVW. → effecten op waterpeil	waterstands fluctuatie zoutgehalte
BR	Riviervoorzieningen (Q)	Studie herverdeling Rijn/Maas afvoer	Hoogwaterbescherming Effecten op achterland (E)
	Milieu-effecten verbeteren	Stagnant → Dynamisch	Meer doorstroming + uitwisseling Verbetering natuurwaarde
	Eigen expertise ontwikkelen	Kennis nemen over Turbines	Buitenlandse expertise visvriendelijkheid, robuustheid, ontwerpen
	Economisch haalbaar bij grote schema's	Toch beginnen met pilot → groot	subsidie nodig
	Kennis uit parallelle vakgebieden (binnenwaterbouw)	Vergelijkende metingen + parametrische studie	Constante afvoer
	Opwekking energie vergelijken met andere bronnen	kWh-prijs vergelijken incl. economische + milieu effecten	Hoe drukt je additionele effecten in geld uit?
	Additionele aspecten: weg verbinden, toerisme	Stakeholders betrekken	mikken PPS - constructie niet alleen overheid of privaat maar beide
	Imago		Imago Nederland op energie waterbouwkundig gebied verbeteren

Polders

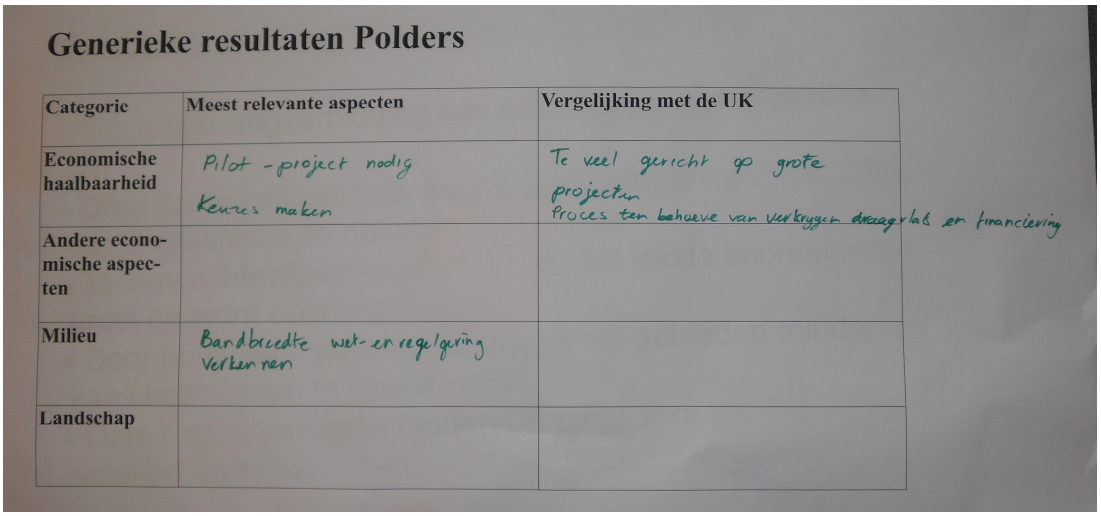
Lessons Learnt	Strategie	Relevante Aspecten
Milieu	Teruggeven aan de natuur	Verlies landbouwgrond ontwikkeling natte natuur
Verlies aan woonfunctie	Politiek aanvaarbaar maken	Aanbieden van gelijkwaardige/drijvende woning
Pilot/Voorbeeldfunctie	Kleinschalig beginnen	Subsidie nodig
Beperking overstromingsrisico	Aftoppen hoogwatergolf	Vormgeving estuarium/vooral bovenstroomse kansreductie
Mosselproductie	Polder geschikt maken voor mosselproductie?	
Combinatie mogelijk met ontpoldering?	Combineer politieke doelstelling/Afspraak met energiewinning	Stakeholders maximaal betrekken Kennis hebben van gemaakte afspraken/wetgeving



Polders

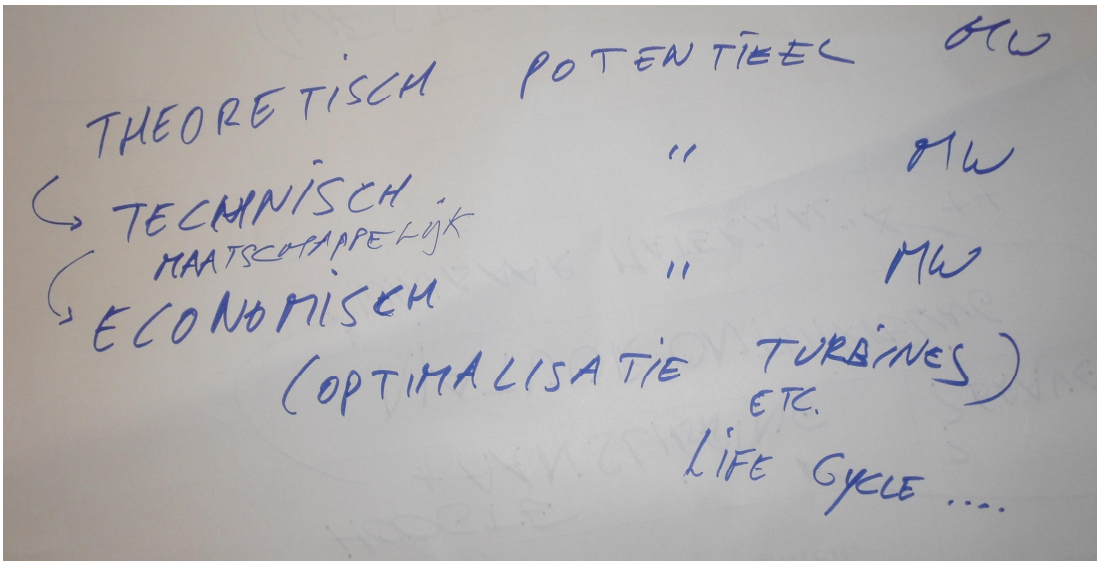
Lessons learnt per categorie (Haalbaarheid, Economie, Milieu, Landschap)	Strategie	Relevante aspecten
Milieu	Teruggeven aan de natuur	Verlies landbouwgrond Ontwikkeling natte natuur
Verlies aan woonfunctie	Politiek aanvaardbaar maken	Aanbieden van gelijkwaardig/dryvande woning
Pilot/Voorbeeldfunctie	Kleinschalig beginnen	Subsidie nodig
Beperking overstromingsrisico	Aftoppen hoogwater golf	Vormgeving estuarium Vooral bovenstroomse kansreductie
Mosselproductie	Polder geschikt maken voor mosselproductie?	
Combinatie mogelijk met ontpoldering?	Combineer politieke doelstelling/Afspraak met energiewinning	Stakeholders maximaal betrekken Kennis hebben van gemaakte afspraken/wetgeving

Categorie	Meest relevante aspecten	Vergelijking met UK
Economische haalbaarheid	Pilot-project nodig Keuzes maken	Te veel gericht op grote projecten Proces t.b.v. verkrijgen draagvlak en financiering
Andere economische aspecten		
Milieu	Bandbreedte wet- en regelgeving verkennen	
Landschap		

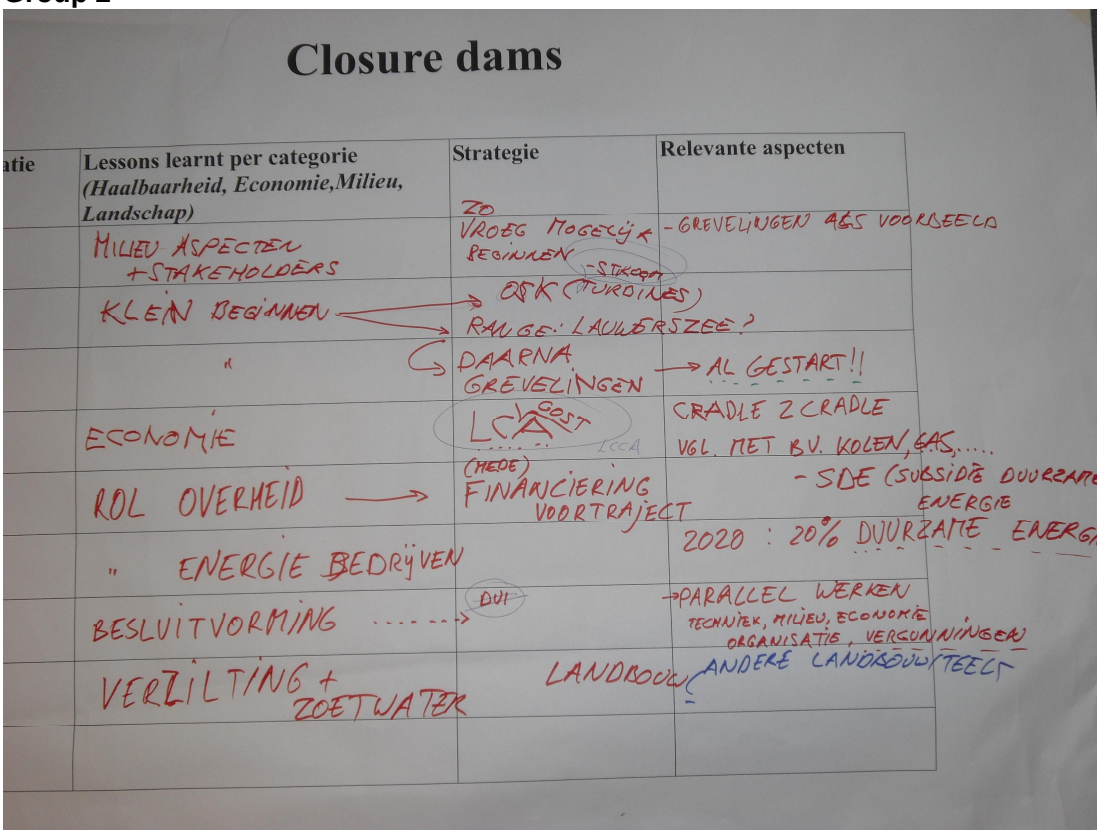


Generieke resultaten Polders

Categorie	Meest relevante aspecten	Vergelijking met de UK
Economische haalbaarheid	Pilot-project nodig Keuzes maken	Te veel gericht op grote projecten Proces ten behoeve van verkrijgen draagvlak en financiering
Andere economische aspecten		
Milieu	Bandbreedte wet- en regelgeving verkennen	
Landschap		



Group 2



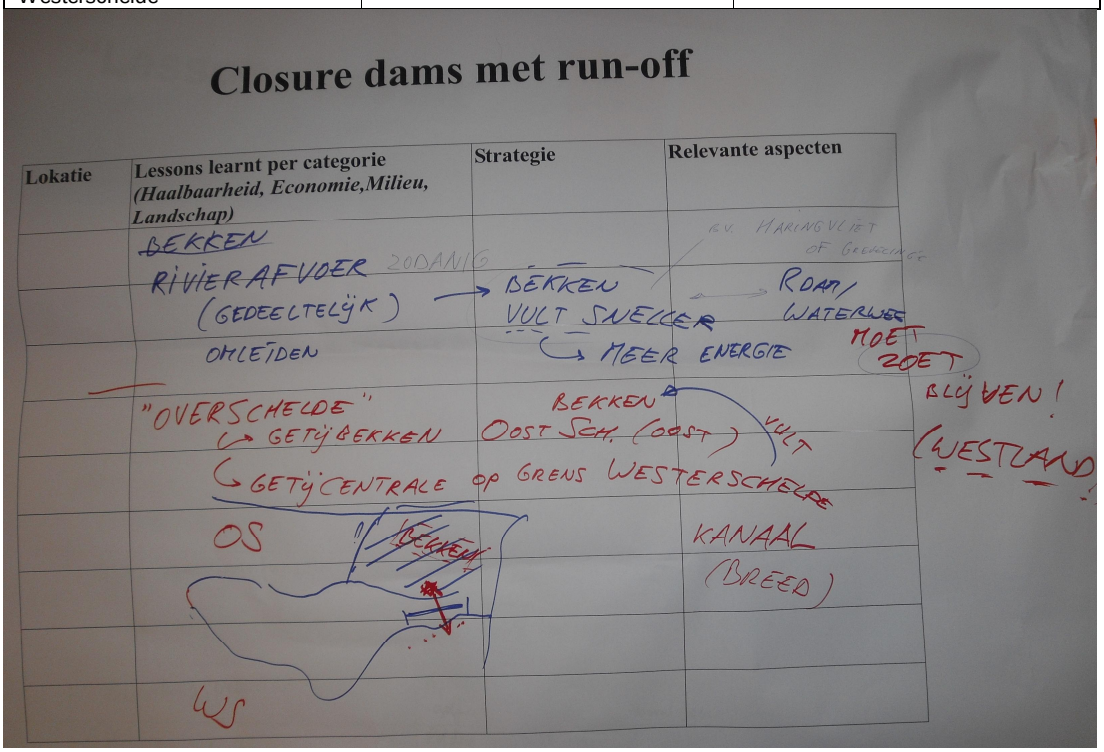
Closure Dams

Lessons Learnt	Strategie	Relevante Aspecten
Milieuaspecten + stakeholders	Zo vroeg mogelijk beginnen (stakeholders betrekken)	Grevelingen als voorbeeld
Klein beginnen	OSK (Turbines) Range; Lauwerszee?	
	Daarna; Grevelingen →	Al gestart
Economie		Cradle to Cradle Vgl. met bv. Kool, Gas,
Rol overhead	(mede) financiering voortraject	SDE (Subsidie Duurzame Energie)

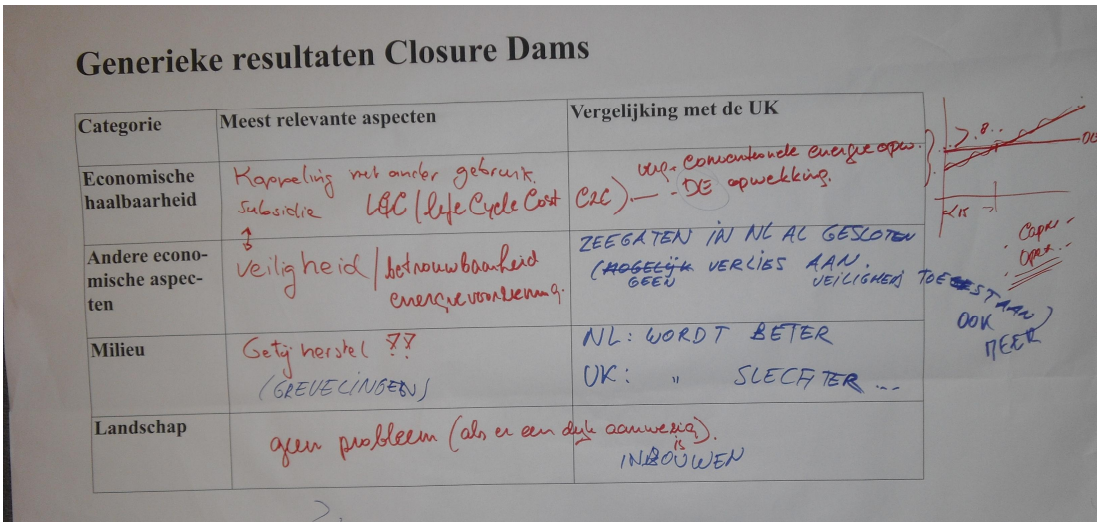
Energiebedrijven		Parallel werken (Techniek, milieu, economie, organisatie, vergunningen)
Verzilting + Zoetwater	Landbouw	Andere Landbouwteelt

Closure Dams met run-off

Lessons Learnt / ideeën	Strategie	Relevante Aspecten
Bekken gebruiken om rivierafvoer (gedeeltelijk) om te leiden	Bekken vult sneller → meer energie	Rotterdam/waterweg moet zoet blijven (westland!)
Overschelde Getijbekken Oosterschelde Getijcentrale op Grens Westerschelde	Oosterschelde wordt gevuld via breed kanaal	



Categorie	Meest relevante aspecten	Vergelijking met UK
Economische haalbaarheid	Koppeling met ander gebruik Subsidie ↔ Life cycle cost (Cradle to Cradle)	Vergelijking conventionele energieopwekking
Andere economische aspecten	Veiligheid Betrouwbaarheid energievoorziening	Zeegaten in NL al gesloten Geen verlies aan veiligheid toegestaan. Mogelijk ook extra veiligheid
Milieu	Getijherstel?? Bijv. Grevelingen	NL: wordt beter UK: wordt slechter
Landschap	Geen probleem (als er een dijk aanwezig is)	Inbouwen

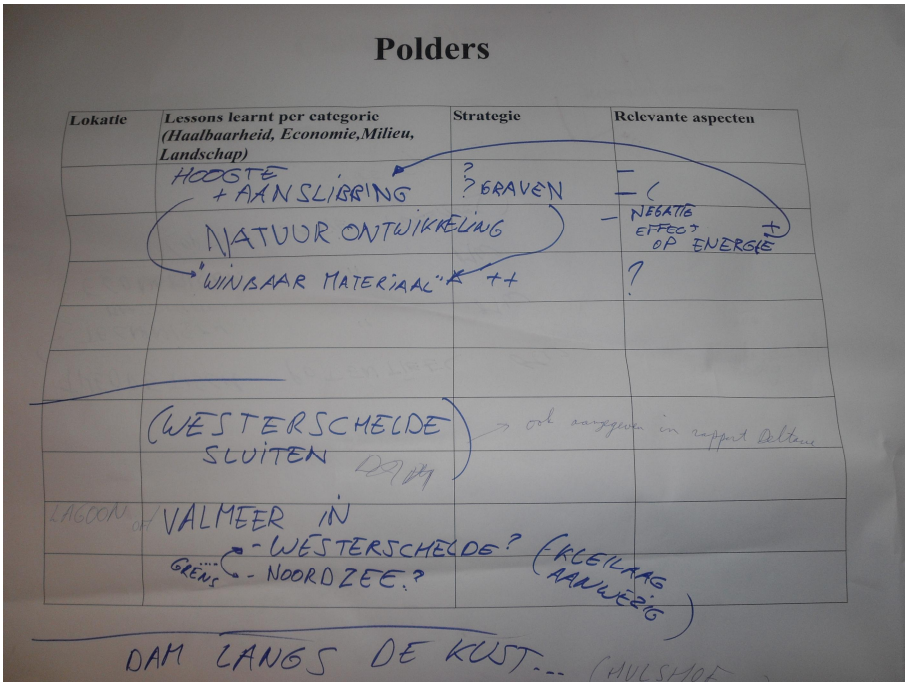


Generieke resultaten Closure Dams

Categorie	Meest relevante aspecten	Vergelijking met de UK
Economische haalbaarheid	Koppeling met ander gebruik. Subsidie LCC (Life Cycle Cost	CAC) — vrij - concurrerende energie opw. - DE opwekking.
Andere economische aspecten	veiligheid / betrouwbaarheid energievoorziening	ZEEGATEN IN NL AL GESLOTEN (MOGELIJK GEEN VERLIES AAN VEILIGHEID TOEGESTAAN) OOK MEER
Milieu	Getij herstel ?? (GREVELINGEN)	NL: WORDT BETER UK: " SLECHTER ...
Landschap	geen probleem (als er een dijk aanwezig is). INBOUWEN	

Polders

Lessons Learnt	Strategie	Relevante Aspecten
Hoogte van maaiveld Aanslibbing	Graven	
Natuurontwikkeling		Negatieve aspecten op energie
Winbaar materiaal		
Andere ideeën		
Westerschelde sluiten met dam (zie rapport Delta-cie)		
Lagoon/Valmeer in Westerschelde (kleilaag aanwezig) Noordzee		
Dam langs de kust (Plan Hulshergen)		



Polders

Lokatie	Lessons learnt per categorie (Haalbaarheid, Economie, Milieu, Landschap)	Strategie	Relevante aspecten
	HOOGTE + AANSLIBBING	? GRAVEN	— (
	NATUUR ONTWIKKELING		— NEGATIE EFFECT OP ENERGIE +
	"WINBAAR MATERIAAL"	++	?
	(WESTERSCHELDE SLUITEN)		
LAGOON	VALMEER IN - WESTERSCHELDE? (KLEILAAG AANWEZIG)		
GRENS	- NOORDZEE?		

DAM LANGS DE KUST... (HULSHOF

5.4.7 Discussie

De resultaten van de groepsessies worden gepresenteerd en besproken in de groep, enkele punten:

- Peter van der Does geeft aan dat hij de energieopbrengst zoals gepresenteerd erg optimistisch vindt. 75% zou volgens hem realistischer zijn dan 85%.
  Leslie Mooyaart geeft aan dat 85% volgens hem redelijke aanname is, mede afhankelijk van afvoer en hoogteverschil. Bij Bulb turbines kan zelfs een nog hoger rendement worden gehaald in riviercentrales;
- Hans van Duijvendijk vertelt over het initiatief van Hulsbergen en Steijn. Energie opwekking door een dam loodrecht op de kust in de Noordzee te realiseren. Energieopwekking vindt plaats doordat het water over de dam stroomt. Meer informatie bij Hulsbergen Hydraulic innovation & Design;
- Paul Paulus vertelt iets over de planstudie Brouwersdam. Indien de Brouwersdam geopend zal worden zal het getijde verschil (5 cm) worden vergroot en zal de waterkwaliteit, de bodem en de ecologie verbeteren;
- Combineren van getijde energie met andere functies;
- Klein beginnen.

6 ANNEX F: DETERMINATION OF ECONOMIC ENERGY AND POWER

6.1 Symbols

Symbol	Parameter	Dimension
γ	Volumetric weight	[kN/m^3]
A	Surface area basin	[m^2]
R	Tidal range	[m]
T	Tidal period	[s]
Δh	Water level difference	[m]
Q	River flow	[m^3/s]
P	Power	[MW]
E	Energy	[J]
c	Constant	[-]

6.2 Introduction

Three different amounts of energy can be determined relating tidal energy: potential, technical and economic energy. The potential energy is the energy available in the system. Technical energy can be defined as the energy that is gained when implementing as much turbines in a dam as possible. Economic energy is the best relation between costs for the power plant and energy to be gained.

In this appendix the potential energy and economic energy are determined. The economic energy is determined with regression from several tidal power projects.

6.3 Method

The potential energy is the energy available in the system. This energy is gained when all the volume of water is released at the highest head during an infinite decimal of time. This means the power at that infinite decimal of time will be infinitely large (∞). The potential energy can therefore only be gained in theory.

The energy that is economic depends on costs and benefits. As costs and benefits result from a design the economically attractive amount of energy requires far more study than the potential amount of energy. Four plans for tidal energy (of which one is realised) were studied to determine the relation between potential and economic energy:

- La Rance, France;
- Severn, UK;
- Mersey, UK;
- Prosper- and Hertogin Hedwigepolder, Western Scheldt, NL.

The determined relation between potential and economic energy is used for an estimation of the economic installed power and annual energy output for locations in the Netherlands. Here a first assumption is made. This is that the relation between the potential energy and the economic energy is constant for one location. This is shown in formula 1.

$$\frac{E_{eco}}{E_{pot}} = c_1 \qquad (1)$$

The second assumption made in this appendix is that the economic installed power has a relation with the potential energy gained per operation and the tidal period in the following manner:

$$P = c_2 \cdot \frac{E_{pot}}{T} \tag{2}$$

The biggest disadvantage of this method is that negative effects due to limited tidal range are not taken into account. For instance, due to a smaller head the efficiency is reduced. It is believed though that these effects are relatively small (<10 %) and depend strongly on turbine characteristics. These turbine characteristics differ for every location and studying these effects seems more appropriate for a case study than in general. It is therefore not elaborated here.

6.4 Dams without run-off

The energy of a volume of water with a certain head can be determined as follows:

$$E = m \cdot g \cdot H = \gamma \cdot V \cdot H \tag{3}$$

With tidal energy the maximal energy is gained when releasing the whole tidal prism at once with the highest head. In this case the volume is equal to the surface area multiplied with the tidal range. In this case the head is half of the tidal range. The potential energy gained during one tidal cycle is then:

$$E = \gamma \cdot V \cdot H = \gamma \cdot A \cdot R \cdot \tfrac{1}{2} \cdot R = \tfrac{1}{2} \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2 \tag{4}$$

The water level variation in the basin when gaining the potential energy is shown in Figure 1. This requires an infinite number of turbines and is therefore purely theoretical. In this figure an indication is also given for the water level variation when placing an economic amount of turbines.

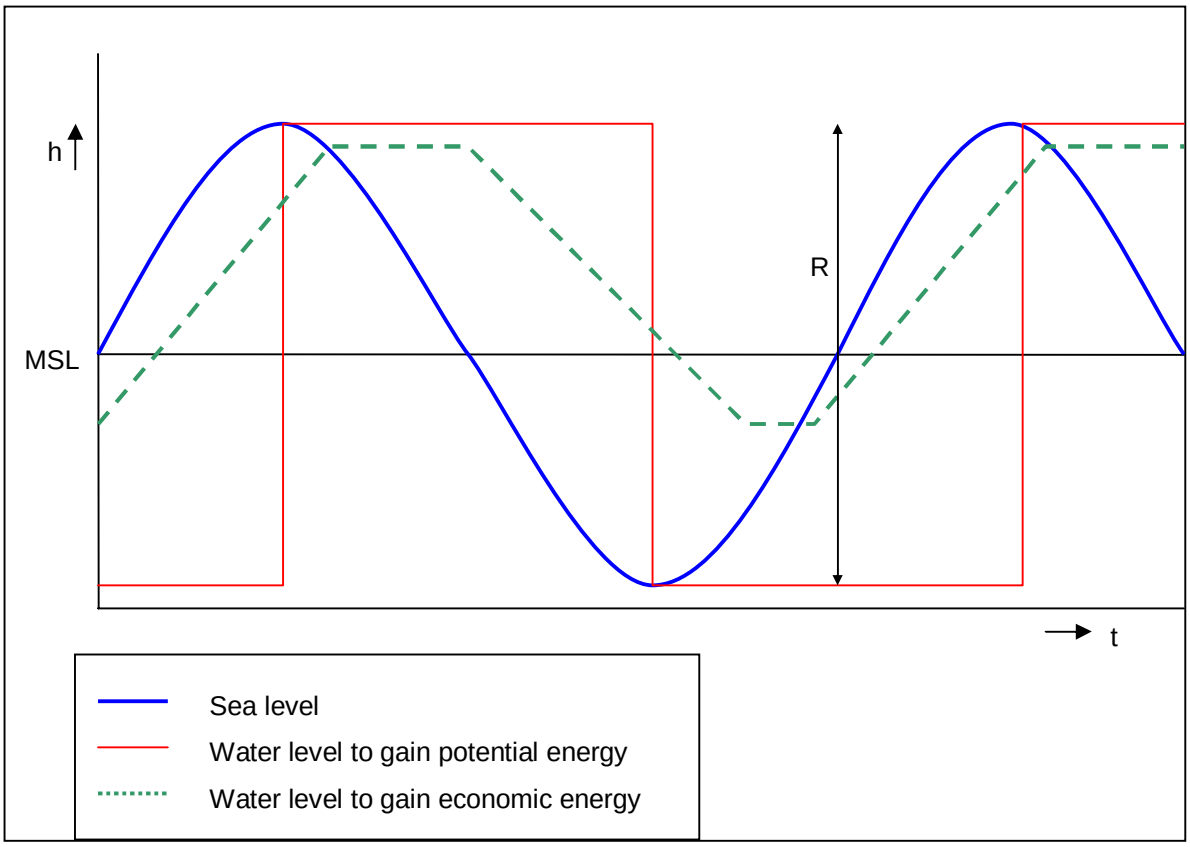


Figure 1: Water levels with potential and economic energy with dams without run-off.

The annual amount of potential energy is calculated with the following formula:

$$E = \sum_{i=0}^{705} \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot R_i^{\,2} = \frac{705}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot R_{rms}^{\,2} \approx 353 \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2 \qquad (5)$$

For calculation of the annual potential energy it is assumed that there are 705 tidal cycles a year (semi-diurnal), that energy is gained in one direction (ebb or flood) and that the average tidal range is equal to the root-mean-square of the tidal range.

Following from formula 1 and formula 5 the economic annual energy output is calculated as follows:

$$E_{eco} = c_1 \cdot E_{pot} = c_1 \cdot 353 \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2 \qquad (6)$$

The economic installed power can be calculated with formula 2 and formula 4:

$$P = c_2 \cdot \frac{E_{pot}}{T} = c_2 \cdot \frac{\tfrac{1}{2} \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2}{T} \qquad (7)$$

The formulas for the potential and economic energy (per year and per operation) as well as the potential and economic installed power are shown in Table 1.

Table 1: Calculation method for potential and economic energy for dams without river run-off.

	Potential	Economic
Energy/operation [J]	$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2$	$c_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2$
Energy/year [J]	$353 \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2$	$c_1 \cdot 353 \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2$
Power [W]	∞	$\frac{c_2 \cdot \gamma \cdot A \cdot R^2}{2 \cdot T}$

The most important parameters for tidal range energy (surface area basin, tidal range, installed power and annual energy output) are available for dams without river-run off for one realised plant (La Rance) and two plans for tidal power plants in the UK. The constants c_1 and c_2 shown in formula 6 and 7 can be determined for these case studies.

Table 2: Key figures for determining constants for dams without run-off.

Location	A [km^2]	R [m]	P [MW]	E [GWh/year]	c_1	c_2 ([3])
La Rance	22,5	8,5	240	650	0,41	1,31
Severn	480	10,5	8640	17000	0,33	1,45
Mersey	63	8	700	1450	0,37	1,54
Average					0,37	1,44

When determining constants c_1 and c_2, dimensions [m], [W] and [J] were used. $3.6 * 10^{12}$ [J] = [GWh/year]. The average of the constants of table 2 together with the formulas of table 1 is used to determine economic values for power and energy for the Dutch locations:

Table 3: Economic optimum for installed power and annual energy gain for dams without run-off in the Netherlands.

Location	A [km^2]	R [m]	P [MW]	E [GWh/year]
Oosterscheldekering	303	2,9	413	918
Brouwersdam	117	2,5	118	263
Lauwerszee	47	2,3	40	90

[3] In this analysis c_1 is a reduction factor meaning that a factor above 1 is not possible. The constant c_2 is not a reduction factor.

6.5 Polders

The energy of a volume of water with a certain head can be determined with formula 3. With tidal energy from polders the maximal energy is gained when releasing all the water in the polder at once with the highest head. In this case the volume is equal to the surface area multiplied with the difference between high water and the elevation of the polder. The head is the average head during this operation. The potential energy gained during one tidal cycle is than:

$$E = \gamma \cdot V \cdot H = \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right) \tag{8}$$

Here Δh is the difference between high water and elevation level of the polder. The water level variation in the basin when gaining the potential energy is shown in Figure 2. This requires an infinite number of turbines and is therefore purely theoretical. In this figure an indication is given for the water level variation when placing an economic amount of turbines.

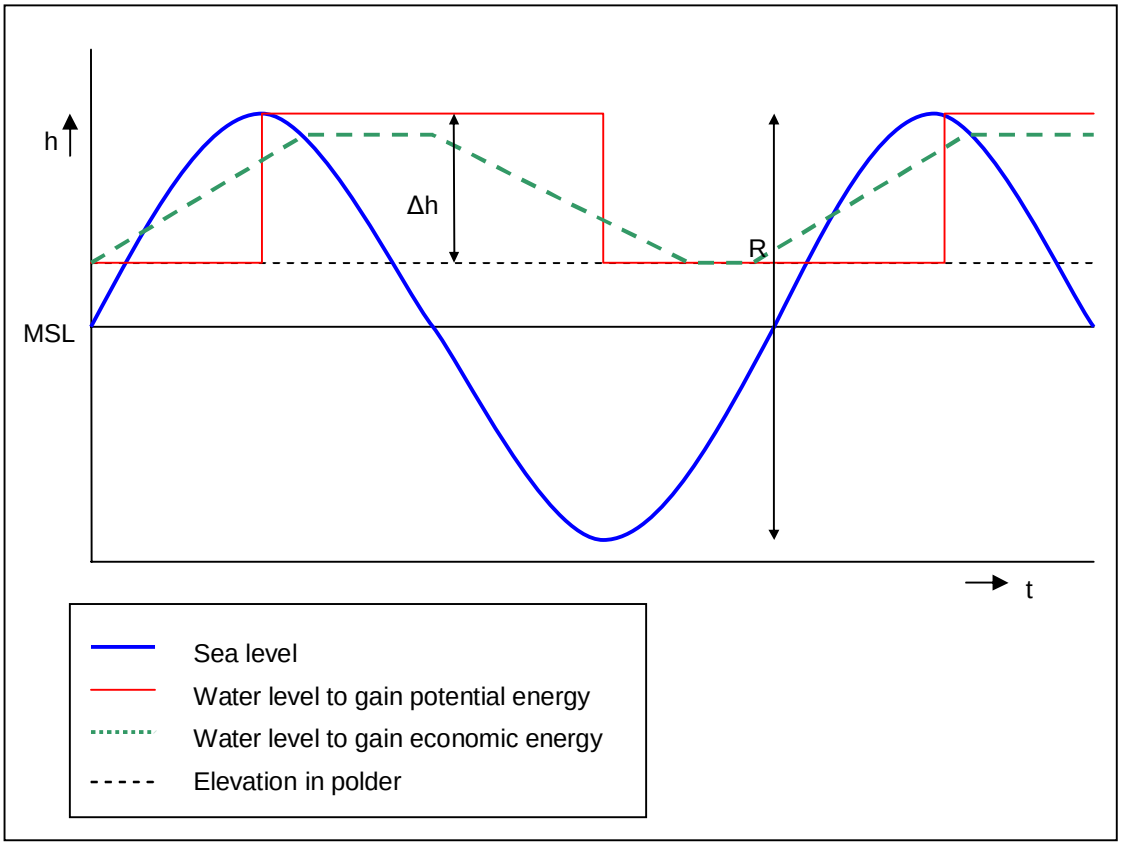


Figure 2: Water levels with potential and economic energy with polders.

The annual amount of potential energy is calculated with the following formula:

$$E = \sum_{i=0}^{705} \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right) \approx 705 \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right) \tag{9}$$

For calculation of the annual potential energy it is assumed that there are 705 tidal cycles a year (semi-diurnal), that energy is gained in one direction (ebb or flood) and

that the average product of the water level difference and tidal range is equal its root-mean-square. Following from formula 1 and formula 9 the economic annual energy output is calculated as follows:

$$E_{eco} = c_1 \cdot E_{pot} = c_1 \cdot 705 \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)$$

(10)

The economic installed power can be calculated with formula 2 and formula 8:

$$P = c_2 \cdot \frac{E_{pot}}{T} = c_2 \cdot \frac{\gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)}{T}$$

(11)

The formulas for the potential and economic energy (per operation and per year) as well as the potential and economic installed power for polders are shown in table 4.

Table 4: Calculation method for potential and economic energy for polders.

	Potential	**Economic**
Energy/operation [J]	$\gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)$	$c_1 \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)$
Energy/year [J] (one direction, semi-diurnal, $\Delta h\ R \sim \sqrt{(\Delta h\ R)_{rms}}$)	$705 \cdot \gamma \cdot A \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right) \cdot \Delta h$	$c_1 \cdot 705 \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)$
Power [W]	∞	$\frac{c_2 \cdot \gamma \cdot A \cdot \Delta h \cdot \left(R - \frac{1}{2} \cdot \Delta h \right)}{T}$

For calculation of the annual potential energy it is assumed that there are 705 tidal cycles a year (semi-diurnal) and that energy is gained in one direction (ebb or flood). It is assumed that the product of the average difference between high water and elevation level of the polder (Δh) and the tidal range (R) is equal to its root-mean-square.

When determining constants c_1 and c_2, dimensions [m], [W] and [J] were used ($3.6 * 10^{12}$ [J] = [GWh/year]). The most important parameters for tidal range energy (surface area basin, tidal range, installed power and annual energy output) are available for one case study (Western Scheldt[4]). The constants c_1 and c_2 shown in formula 10 and 11 can be determined for this tidal power plant. Using the formulas of table 1 and the determined constants from the analysis of the Western Scheldt, the economic values for power and energy are found for the Johannes Kerkhoven polder (Eems-Dollard)

[4] This study is a result of a Master thesis and therefore less detailed as the studies done for La Rance, the Severn and the Mersey.

Table 5: Economic optimum for installed power and annual energy gain for polders in the Netherlands.

Location	A [km^2]	R [m]	Δh [m]	P [MW]	E [GWh/year]	c_1	c_2
Western Scheldt	13,3	5,0	1,3	21,5	64,3	0,44	1,29
Eems-Dollard	4,0	3,0	2,0	4,6	13,9	-	-

6.6 Dams with run-off

It is believed that in the Netherlands it is not desirable to increase the salt gradient of the Ijsselmeer (Afsluitdijk) and the Haringvliet a lot, since the fresh water supply of the Netherlands depends on these lakes. Due to this requirements changes in the current water level lead to much discussion. When regarding these issues and allowing large quantities of salt water to intrude in the lakes, formulas (8) and (9) can be used to determine the economic energy. The results are shown in Table 6.

Table 6: Economic optimum for installed power and annual energy gain for dams with run-off in the Netherlands when allowing salt water in lakes.

Location	Basin Area [km^2]	Tidal Range [m]	Power [MW]	Energy [GWh/year]
Afsluitdijk	1100	1,8	577	1284
Haringvliet	100	2,3	86	191

As stated before it is not desirable to change the water management of these areas (a lot) and therefore another approach is suggested. Here just the river run-off will be used to gain energy from. Here for the volume per operation is the river flow multiplied with the period of the tidal cycle. The maximum head is assumed to be the difference between low water and the water level of the lake. Formula 3 can then be used to determine the potential energy:

$$E = \gamma \cdot V \cdot H = \gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h \qquad (12)$$

Here Δh is the difference between average level in basin and average low water. The water level variation in the basin when gaining the potential energy is shown in Figure 3. This requires an infinite number of turbines and is therefore purely theoretical. In this figure an indication is given for the water level variation when placing an economic amount of turbines.

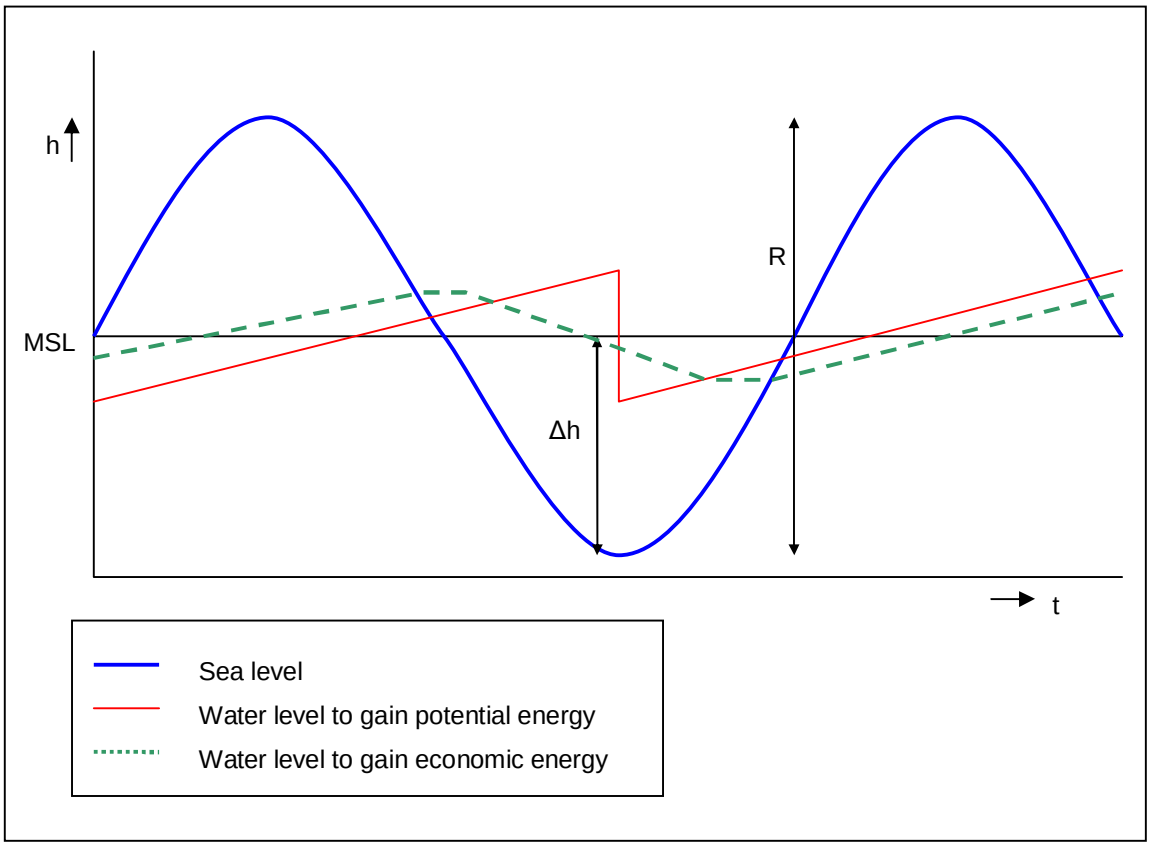


Figure 3: Water levels with potential and economic energy with dams with run-off.

For calculation of the annual potential energy it is assumed that there are 705 tidal cycles a year (semi-diurnal), that energy is gained in one direction (ebb or flood) and that the average product of the water level difference and tidal range is equal its root-mean-square.

Following from formula 1 and formula 12 the economic annual energy output is calculated as follows:

$$E_{eco} = c_1 \cdot E_{pot} = c_1 \cdot \gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h \quad (13)$$

The economic installed power can be calculated with formula 2 and formula 12:

$$P = c_2 \cdot \frac{E_{pot}}{T} = c_2 \cdot \frac{\gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h}{T} = c_2 \cdot \gamma \cdot Q \cdot \Delta h \quad (14)$$

The formulas for the potential and economic energy (per operation and per year) as well as the potential and economic installed power are shown in Table 7.

Table 7: Calculation method for potential and economic energy for dams with run-off.

	Potential	Economic
Energy/operation [J]	$\gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h$	$c_1 \cdot \gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h$
Energy/year [J] (one direction, semi-diurnal)	$705 \cdot \gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h$	$c_1 \cdot 705 \cdot \gamma \cdot Q \cdot T \cdot \Delta h$
Power [W]	∞	$c_2 \cdot \gamma \cdot Q \cdot \Delta h$

There are no tidal power projects that are similar to these projects. It is therefore suggested to assume a certain relation between potential and economic energy. In this appendix it is assumed that constants c_1 and c_2 determined for dams without river run-off are valid for dams with river run-off. This assumption is crude and more study about this type of tidal power plant is recommended. The results from this analysis are shown in Table 8.

Table 8: Economic optimum for installed power and annual energy gain for dams with river run-off in the Netherlands.

Location	Q [m^3/s]	Δh [m]	P [MW]	E [GWh/year]	c_1	c_2
Afsluitdijk	500	0,7	5,1	11,4	0,37	1,44
Haringvliet	750	1,4	15,2	34,2	0,37	1,44

6.7 Conclusions

Table 9: Economic optimum for tidal power plants in La Rance, UK and Netherlands.

Location	A [km^2]	R [m]	Q [m^3/s]	Δh [m]	P [MW]	E [GWh/year]
La Rance	22,5	8,5	-	-	240	650
Severn Barrage	480	10,5	-	-	8640	17000
Mersey	63	8,0	-	-	700	1450
Netherlands						
Oosterscheldekering	303	2,9	-	-	413	918
Brouwersdam	117	2,5	-	-	118	263
Lauwerszee	47	2,3	-	-	40	90
Haringvliet	100*	2,3*	750	1,4	10,6	37,0
Afsluitdijk	1100*	1,8*	500	0,7	3,5	12,3
Eems-Dollard	4,0	3,0	-	2,0	4,6	13,9
Western Scheldt	13,3	5,0	-	1,3	21,5	64,3

*not used for determination of P and E.

=o=o=o=