

**Die Polder der niederländischen Provinz  
Noord-Holland:  
Die Funktionsweise ihres  
Entwässerungssystems und mögliche  
Auswirkungen der bevorstehenden  
Klimaänderung**



**Maturaarbeit von Linda Frossard**

**Betreut von Herrn Georg Thormann**



**Klasse 1b  
Mathematisch-Naturwissenschaftliches Gymnasium Bern-Kirchfeld  
November 2004**

**Die Polder der niederländischen Provinz  
Noord-Holland:  
Die Funktionsweise ihres  
Entwässerungssystems und mögliche  
Auswirkungen der bevorstehenden  
Klimaänderung**

**Maturaarbeit von Linda Frossard**

**Betreut von Herrn Georg Thormann**

**Klasse 1b  
Mathematisch-Naturwissenschaftliches Gymnasium Bern-Kirchenfeld  
November 2004**

Fotos Umschlag:  
Zuoberst rechts: "*Kreativ Foto CD*"; Franzis' Verlag GmbH, Poing, 2002.  
Übrige: L. Frossard

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Klimaänderung weltweit</b> .....	<b>2</b>
2.1	Treibhausgase und Strahlungsbilanz .....	3
2.2	Niederschlag .....	5
2.3	Temperaturerhöhung und Wasserhaushalt .....	6
<b>3</b>	<b>Polder</b> .....	<b>7</b>
3.1	Definition .....	8
3.2	Landgewinnung im Lauf der Zeit .....	8
3.3	Funktionsweise .....	12
3.3.1	Entwässerungssystem .....	12
3.3.2	Von der Einzelmühle zum Mühlengang .....	13
3.3.3	Von der Dampfkraft zur Gegenwart .....	15
3.4	Bodenbeschaffenheit und Grundwasser .....	17
3.5	Nutzung und Bedeutung .....	18
<b>4</b>	<b>Auswirkungen der Klimaänderung auf das Poldersystem</b> .....	<b>20</b>
4.1	Klimaänderung in den Niederlanden .....	20
4.2	Technische Auswirkungen .....	22
4.2.1	Wasserkreislauf im Modellpolder .....	23
4.2.2	Grösseres Regenereignis .....	24
4.2.3	Mögliche Massnahmen .....	25
4.2.4	Paradox: „Trockenheit“ im Polder .....	27
4.2.5	Die wichtige Rolle des IJsselmeers .....	28
4.2.6	Meeresspiegelanstieg .....	31
4.3	Ökologische Auswirkungen .....	32
4.3.1	Temperaturanstieg .....	32
4.3.2	Meeresspiegelanstieg .....	34
4.4	Wirtschaftliche Auswirkungen .....	35
<b>5</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Quellenangaben</b> .....	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Bildverzeichnis</b> .....	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Anhang (Landkarten Niederlande und Noord-Holland)</b> .....	<b>40</b>

# 1 Einleitung und Problemstellung

Über die bevorstehende Klimaänderung ist heutzutage in den Medien immer wieder etwas zu hören oder zu lesen. Die Monatstemperaturen sind sehr oft höher als der langjährige Durchschnitt, die Nullgradgrenze steigt im Sommer immer höher, die Gletscher schmelzen, extreme Niederschläge führen zu Erdbeben oder Überschwemmungen. Solche Phänomene konnten während der letzten paar Jahre gerade in der Schweiz vermehrt beobachtet bzw. erfahren werden. In den Alpen wird die Klimaänderung schwerwiegendere Auswirkungen haben als anderswo, weil Gebirge sehr empfindlich auf Klimaschwankungen reagieren. Trotzdem sind wir Schweizer nicht die einzigen, die von der Klimaänderung betroffen sind. Wir Schweizer? Nun ja, von meinem Pass her kann ich das gut sagen, der ist nämlich rot mit dem kleinen weissen Kreuz darauf, doch die Hälfte meines Erbgutes stammt nicht aus der Schweiz, sondern aus den Niederlanden. Nach dem ersten Aufenthalt in meinem zweiten Heimatland war ich schon etwas neugierig, wie es möglich ist, dass man auf einer unter dem Meeresspiegel liegenden Strasse Velo fährt, ohne dies zu merken. Auch in den Poldern der Provinz Noord-Holland trifft das zu. Die Polder sind normal befahrbar, weil sie in der Vergangenheit entwässert wurden und auch heute überschüssiges Wasser ständig abgepumpt wird. Deiche und Dünen schützen das trocken gehaltene Land vor dem Meer.

Mit dieser Maturaarbeit wollte ich unter anderem in Erfahrung bringen, ob das Land bei einem Anstieg des Meeresspiegels mit der bisherigen Entwässerungsmethode trocken gehalten werden kann. Dazu möchte ich aufzeigen, was die Klimaänderung in den besagten Poldern für Folgen haben wird, und was man am Entwässerungssystem allenfalls ändern müsste. Die Arbeit handelt also nicht von der Bekämpfung der Klimaänderung, sondern vom Umgang mit diesem wahrscheinlich unvermeidbaren Vorgang.

Damit der Leser die Arbeit auch ohne Vorkenntnisse lesen und ihren Inhalt verstehen kann, handelt das zweite Kapitel von der weltweiten Klimaänderung. Das dritte Kapitel führt in die Geschichte der Polder in Noord-Holland ein und erklärt die heutige Funktionsweise ihrer Entwässerung. Im vierten Kapitel wird zuerst kurz über die Klimaänderung in den Niederlanden berichtet. Die dadurch zu erwartenden Auswirkungen in den Poldern habe ich in drei Kategorien aufgeteilt: Zu den technischen Auswirkungen gehören Phänomene, die das Polderentwässerungssystem direkt oder indirekt betreffen und denen man mit Hilfe von technischen Geräten oder Einrichtungen entgegenwirken kann. Danach gehe ich auf mögliche Veränderungen im Ökosystem, also der Tier- und Pflanzenwelt sowie deren Lebensraum, ein. Schliesslich habe ich selber versucht, wirtschaftliche Folgen der Klimaänderung zu ergründen.

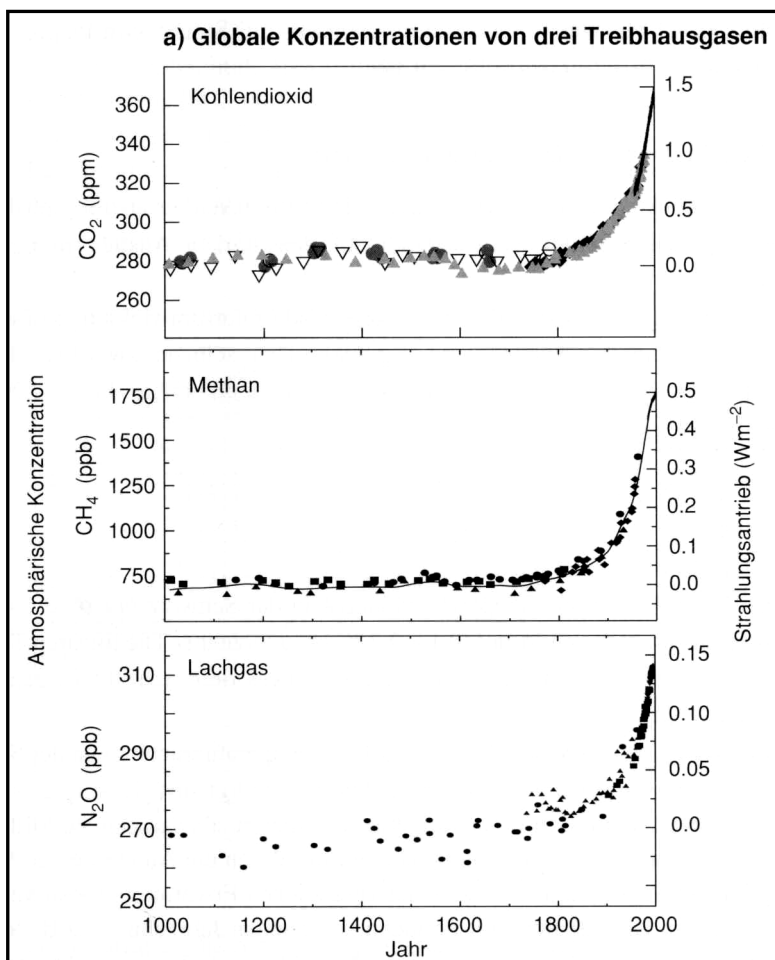
Anhand eines einfachen, selbst entworfenen Modellpolders habe ich probiert, die möglichen Folgen für das Entwässerungssystem mit möglichst konkreten Zahlen zu belegen. Zusätzlich habe ich mich bei meinem diesjährigen zweiten Aufenthalt in Noord-Holland vor Ort mit dem Entwässern der Polder auseinandergesetzt, indem ich eine Windmühle und ein elektrisches Pumpwerk besuchte. Schliesslich habe ich auch geeignetes Bildmaterial aufgenommen.

## 2 Klimaänderung weltweit

Anfangs wurde nur darüber spekuliert, doch inzwischen sind sich die Experten einig: Das globale Klima unserer Erde erwärmt sich und dieser Prozess wird in diesem Jahrhundert weiter fortschreiten.

Natürliche Klimaänderungen haben im Laufe der Erdgeschichte immer wieder stattgefunden, denn das Klima ist abhängig von Atmosphäre, Wasserflächen, Landflächen, Boden und der Biosphäre (besonders der Vegetation).

In der Atmosphäre spielt vor allem das einfallende Sonnenlicht eine Rolle. Wenn ein Teil davon von der Erdoberfläche reflektiert wird, lässt die Atmosphäre das kurzwellige UV-Licht durch zurück in den Welt- raum, absorbiert aber einen Teil des warmen Infrarot-Lichtes. Diese Tatsache ist auf die so genannten Treibhausgase zurückzuführen, ohne die es auf der Erde für Leben viel zu kalt wäre. Die wichtigsten Treibhausgase sind neben Wasserdampf Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Diese Gase kommen alle natürlich vor, werden aber durch die Tätigkeiten der Menschen zusätzlich produziert oder freigesetzt. Kohlendioxid entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, wie z.T. auch Methan, und verbleibt nach Umnutzungen von Naturflächen (v.a. Waldrodungen) vermehrt in der Atmosphäre. Methan stammt zusätzlich aus den Mägen von Wiederkäuern, aus Reisfeldern und aus Abfalldeponien, während Lachgas vor allem durch die Verwendung von natürlichen und künstlichen Düngern freigesetzt



wird. Daher verwundert es kaum, dass die Konzentration des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre seit dem Beginn der industriellen Revolution um 1750 um 30%, diejenige des Methans sogar um 151% zugenommen hat. Die Lachgaskonzentration hat im gleichen Zeitraum um 17% zugenommen [5].

Bild 1 Konzentration der Treibhausgase im Verlauf der Zeit. Skalen beachten! [7]

## 2.1 Treibhausgase und Strahlungsbilanz

Die heutige Konzentration dieser Gase ist die höchste seit 420'000 Jahren, zudem gab es in den letzten 20'000 Jahren nie einen so rasanten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Das wichtigste Treibhausgas Wasserdampf, von dem es auch weitaus am meisten hat in der Atmosphäre, absorbiert die Sonnenstrahlen nicht auf der gesamten Breite des Infrarotspektrums. Genau diese Lücken werden jedoch von den anderen drei Gasen, die nur punktuelle Wellenlängen absorbieren, weitgehend gedeckt. Deswegen und weil die Treibhausgase nur relativ langsam abgebaut werden, sind sie überhaupt zum Problem geworden. Der Anstieg ihrer Konzentrationen ist hauptverantwortlich für eine Erhöhung der gesamten Strahlungsbilanz der Erde, welche bewirkt, dass die Atmosphäre wärmer wird. Somit scheint die Klimaänderung vom Menschen verursacht zu sein [7].

Neben den erwähnten Treibhausgasen führen auch halogenierte Kohlenwasserstoffe und troposphärisches Ozon zu einer positiveren Strahlungsbilanz.

Aerosole hingegen – das sind sehr kleine Schwebeteilchen, welche bei Verbrennungsprozessen freigesetzt werden (Schwefel, Russ und organische Kohlenstoffteilchen) – tragen zu einer negativeren Strahlungsbilanz bei, doch ihre Konzentration hat dank technologischer Fortschritte gegen Ende des 20. Jahrhunderts wieder abgenommen. Der Abbau des stratosphärischen Ozons führt ebenfalls zu einer leicht negativeren Strahlungsbilanz.

Natürliche Faktoren, welche die Strahlungsbilanz beeinflussen, sind der 11-jährige Sonnenaktivitätszyklus und Vulkanausbrüche. Bei letzteren gelangen sehr viele Aerosole in die Stratosphäre, sodass sie sich auf die Strahlungsbilanz negativ auswirken. Im Vergleich zur Veränderung der Strahlungsbilanz durch die Treibhausgase ist die Auswirkung dieser beiden natürlichen Faktoren jedoch sehr gering.

Tabelle 1 Übersicht der Faktoren, welche die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen

<b>Erhöhung</b>	<b>Erniedrigung</b>
Treibhausgase	Aerosole (auch von Vulkanausbrüchen)
halogenierte Kohlenwasserstoffe	Abbau des stratosphärischen Ozons
troposphärisches Ozon	
natürliche Sonnenaktivität	

Auch die heutigen Modellrechnungen zeigen, dass die aktuelle Klimaerwärmung vom Mensch verursacht ist. Wenn dem Computer nicht eine erhöhte Treibhausgaskonzentration vorgegeben wird, stimmt die beobachtete Temperaturerwärmung nicht mit den Modellrechnungen überein.

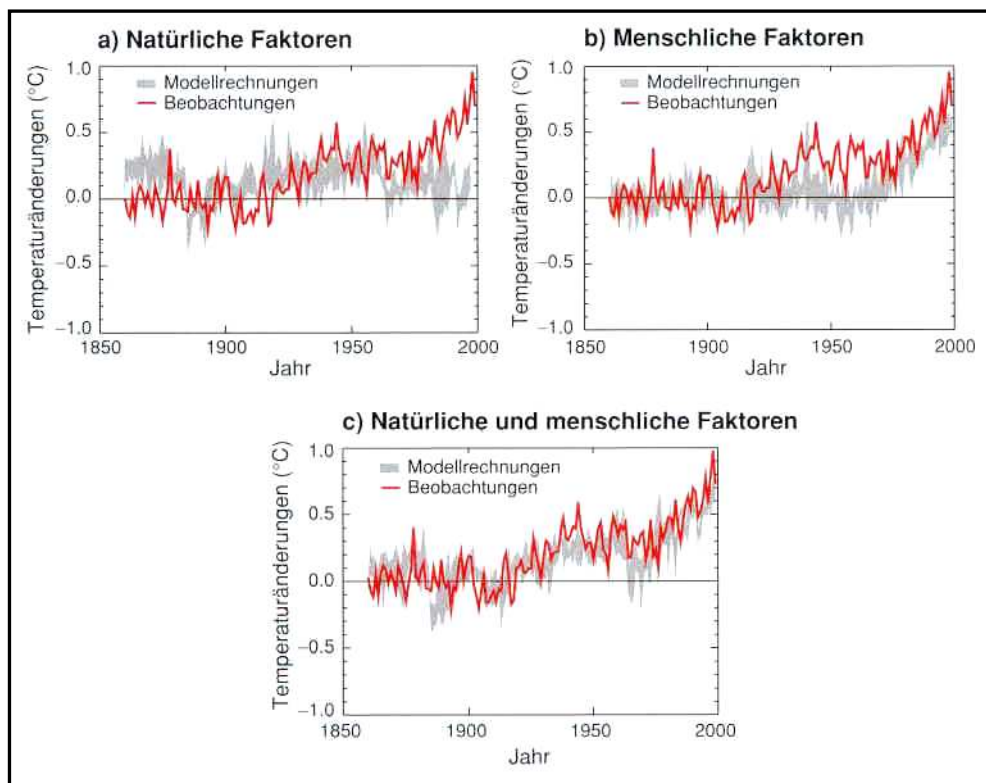


Bild 2 Veränderung der globalen mittleren Temperatur von 1850 bis 2000 basierend auf drei Modellsimulationen (a, b und c) im Vergleich mit den beobachteten Temperaturen [7]

Hauptsächlich wegen der erhöhten Treibhausgaskonzentrationen ist die gemittelte globale Oberflächentemperatur seit Beginn der Instrumentenmessungen 1861 um  $0,6(\pm 0,2)$  °C gestiegen. Die 1990er-Jahre gelten als das wärmste Jahrzehnt in dieser Periode und der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert als der grösste der letzten tausend Jahre.

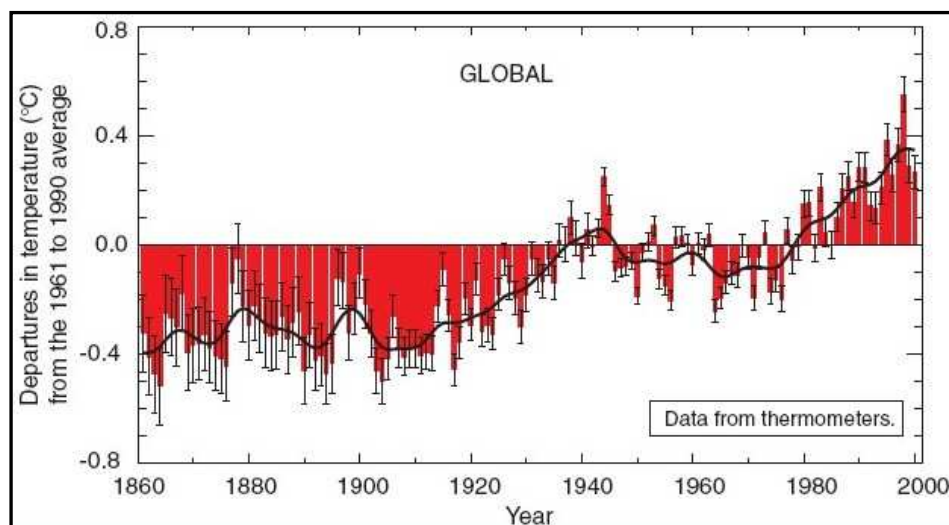


Bild 3 Schwankungen der Erdoberflächentemperatur von 1860 bis 2000 [4]



Diese globale Erwärmung der Atmosphäre ist aber nicht überall auf der Welt gleich ausgeprägt. Neben der Erwärmung, die je nach Ort in verschieden grossem Ausmass erfolgte, gab es regional auch Abkühlungen. In den letzten 20 Jahren war jedoch vor allem die Nordhalbkugel und dort speziell Europa von der Erwärmung betroffen [33].

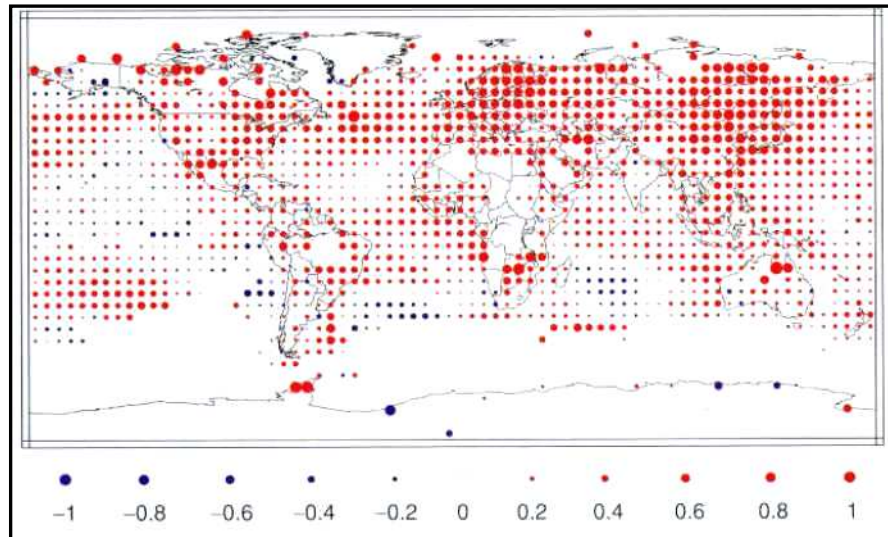


Bild 4 Temperaturtrends pro Jahrzehnt aus den Jahresmitteltemperaturen 1976 bis 2000. Die Trends sind durch die Grössen der Punkte gekennzeichnet (Erwärmung rot, Abkühlung blau) [7]

Neben regionalen und zeitlichen gibt es auch jahreszeitliche Unterschiede, erfolgte doch in Europa die grösste Erwärmung relativ gesehen in den Wintermonaten. Zudem hat die Nachttemperatur mehr zugenommen als die Tagestemperatur, was mehr frostfreie Tage zur Folge hat. Ein weiteres Indiz für die Erwärmung ist die Abnahme der Häufigkeit von minimalen Extremwerten neben einer leichten Zunahme maximaler Extremtemperaturen.

## 2.2 Niederschlag

Der Verlauf des Niederschlags ist schwieriger zu beurteilen, weil er einerseits viel grössere lokale Unterschiede aufweist als die Temperatur und andererseits sehr stark an die atmosphärische Zirkulation gebunden ist. So kann man nicht von einer globalen Zu- oder Abnahme sprechen, sondern eher von regionalen Umverteilungen [33]. Auf der Nordhalbkugel haben die Niederschläge über den Kontinenten der mittleren bis hohen Breiten im 20. Jahrhundert um 0,5-1% pro Jahrzehnt zugenommen, im tropischen Bereich um 0,2-0,3% pro Jahrzehnt. In subtropischen Breiten (10-30°N) ist der Niederschlag in der gleichen Periode um 0,3% pro Jahrzehnt zurückgegangen. Auf der Südhalbkugel wurden auf bestimmte Breiten bezogen keine systematischen Abweichungen von den Mittelwerten festgestellt. Für Aussagen über den Niederschlag auf den Ozeanen sind nicht genügend Daten vorhanden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat allerdings auf der Nordhalbkugel die Häufigkeit von schweren Niederschlagsereignissen um 2-4% zugenommen.

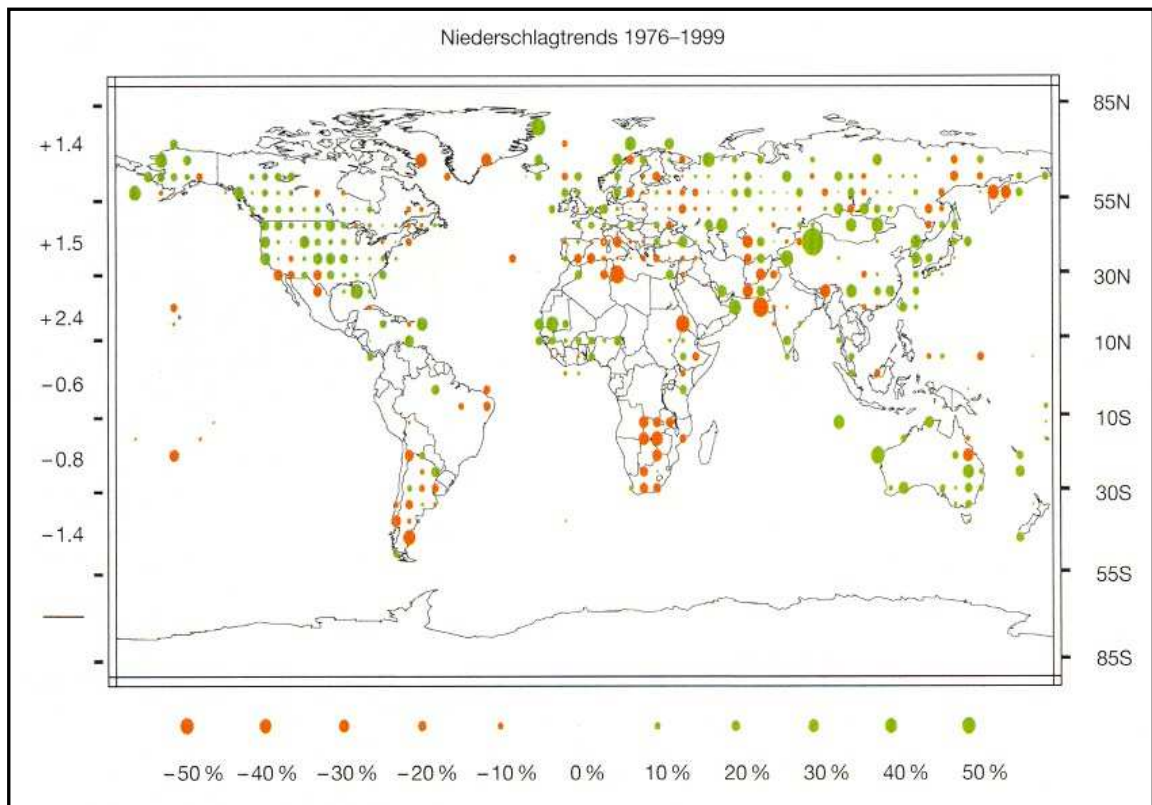


Bild 5 Lineare prozentuale Trends 1976 bis 1999 des jährlichen Niederschlags der Landgebiete [33]

Solche Ereignisse sind jedoch abhängig vom Wassergehalt in der Atmosphäre sowie von der Gewitter- und Sturmaktivität. Seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts hat wahrscheinlich die Menge Wasserdampf in der Atmosphäre zugenommen, zudem hat die Wolkenbedeckung in den mittleren und hohen nördlichen Breiten über den Kontinenten um 2% zugenommen. Dies stimmt gut mit den beobachteten kleineren Tagesschwankungen der Temperatur überein, denn die Wolken wirken wie eine Isolierschicht.

### 2.3 Temperaturerhöhung und Wasserhaushalt

Die Temperaturerhöhung hat weitreichende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Erde. Der Meeresspiegel ist im vergangenen Jahrhundert um 10-25 cm angestiegen, was einer grösseren Erhöhung als bisher entspricht. Hauptursache ist die thermische Ausdehnung des wärmeren Meerwassers, doch auch der weit verbreitete Rückzug der ausserpolaren Gebirgsgletscher und des arktischen Eises tragen einen grossen Teil dazu bei. Das Inlandeis der Antarktis nimmt wegen des Niederschlages eher zu – wirkt also dem Meeresspiegelanstieg entgegen [33]. Im Weiteren hat die Schneebedeckung seit Ende der 60er-Jahre um etwa 10% abgenommen. Auf der Nordhalbkugel hat sich die Dauer der Eisbedeckung von Seen und Flüssen um etwa zwei Wochen verkürzt. Auch die nördliche Meereisbedeckung ist am Zurückgehen, besonders diejenige im arktischen Raum.

Bereits jetzt besonders interessant für die breite Öffentlichkeit (da aktuell) ist die Frage, ob die Anzahl der Extremereignisse, seien es nun Stürme, Hochwasser oder Dürre, mit der Klimaänderung zunimmt oder die einzelnen Ereignisse intensiver werden. Bei Betrachtung der Statistiken der Rückversicherungen seit 1950 scheint die Antwort klar ja zu sein, denn die (versicherten) Schäden haben enorm zugenommen. Dies ist allerdings auch auf die Konzentration der Versicherungswerte zurückzuführen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es unklar, ob die Häufigkeit von Stürmen weltweit zugenommen hat. Bei Niederschlagsextrema scheint dies eher der Fall zu sein. An den Orten, wo der Niederschlag allgemein zunimmt, hat man eine Häufung extremer Niederschlagsereignisse festgestellt; im nördlicheren Europa kommen solche Ereignisse vor allem im Winter vor [33].

Es liegt auf der Hand, dass die Veränderungen im Wasserkreislauf Landgebiete, welche unter dem Meeresspiegel liegen, besonders stark betreffen. Die Niederlande gehören zu den europäischen Regionen, die mit diesem Problem konfrontiert sind. Im Folgenden wird deshalb das Poldersystem erklärt und danach auf die drohenden Probleme bei Klimaänderungen eingegangen.

### 3 Polder

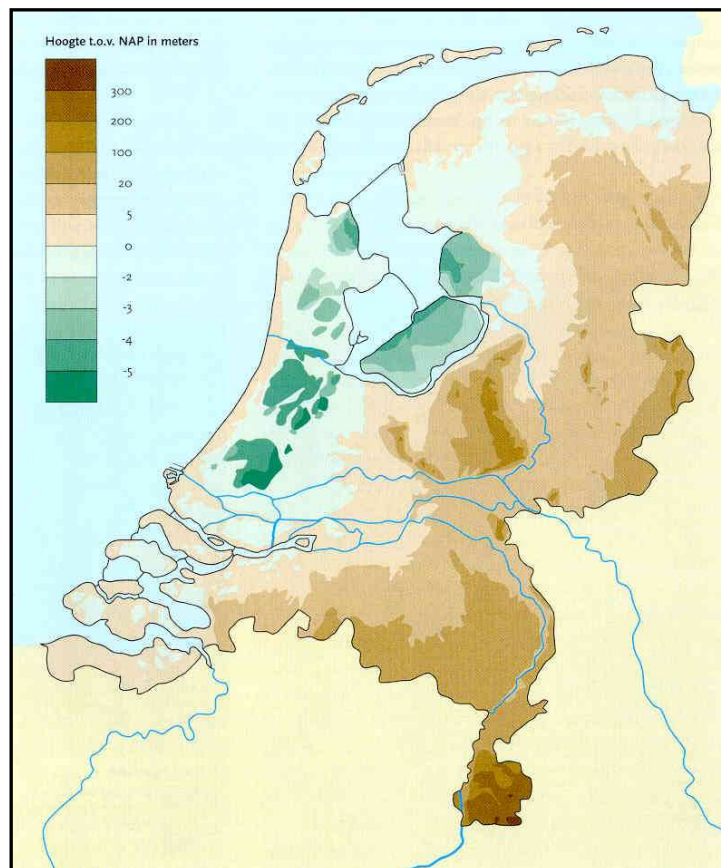


Bild 6 Höhenstufenkarte der Niederlande [34]

### 3.1 Definition

Grundsätzlich bezeichnet man mit dem Begriff „Polder“ ein von Deichen umgebenes Stück Land, in dem der Wasserpegel mit Hilfe eines Systems von Kanälen und Pumpen künstlich geregelt wird. Diese Landstücke ergaben sich aus der künstlichen Entwässerung von Moorgebieten. Sie liegen meistens unter dem Meeresspiegel [17].

Es gibt verschiedene Arten von Polder. Die so genannten Moorpolder entstanden, weil Flachmoorgebiete wegen Bodensenkungen unter den Meeresspiegel zu liegen kamen, sodass sie eingedeicht werden mussten. In den Gebieten der Meerespolder wurde vom Meer Meerton angeschwemmt und abgelagert. Wenn die Fläche genügend gross und hoch war, wurde sie eingedeicht. Dies ist vor allem in den Provinzen Friesland und Groningen geschehen. Dann gibt es schliesslich auch noch die „droogmakerijen“ (wörtlich übersetzt: Trockenlegungen). Dabei wurden natürliche Seen oder Moortümpel zuerst eingedeicht und dann trockengelegt. Diese Polder sind in der Provinz Noord-Holland weit verbreitet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird vor allem diese Art von Polder berücksichtigt werden.

### 3.2 Landgewinnung im Lauf der Zeit

Nach der letzten Eiszeit stieg der Meeresspiegel der Nordsee an, weil viel Wasser von den schmelzenden Gletschern freigesetzt wurde. Mit der Zeit häufte sich der vom Meer angespülte Sand zu Strandwällen an, welche das dahinter liegende Gebiet vom Meer abschirmten. Es kam zur Moorbildung, welche vom hohen Grundwasserspiegel und dem Schilfbewuchs begünstigt wurde [32].

Nach 800 n. Chr. begannen die Menschen, diese Moorgebiete urbar zu machen. Dazu legten sie Entwässerungsgräben an. Diese Urbarmachung war aber die Ursache der nachfolgenden Landverluste. Bei der Entwässerung der Moore senkt sich der Boden: Einerseits nimmt das Bodenvolumen ab, weil Wasser entzogen wird; andererseits wird die Sauerstoffzufuhr erhöht, sodass die Abbauaktivität der Mikroorganismen zunimmt. Zudem bewirkt das Pflügen der Äcker eine Oberflächenvergrösserung und damit auch eine zunehmende Zersetzung [34]. Die Bedrohung des neuen Agrarlandes durch das Meer wurde immer grösser, weshalb als Schutz Deiche gebaut werden mussten. Für den Unterhalt der Deiche schlossen sich die Leute zu Deichgenossenschaften zusammen, die so genannten „waterschappen“.

Zwischen 1100 und 1400 gab es viele Sturmfluten, die immer wieder andere Gebiete trafen. Das Meer drang nach und nach in den damaligen Binnensee Almere in der Mitte des Landes ein und verwandelte ihn in einen Meeresarm, die Zuiderzee. Die grössere Angriffsfläche des Meeres führte in den entwässerten Gebieten in Noord-Holland zur Seenbildung.

Diese Binnenseen mussten mit Dämmen von der Zuiderzee abgeschlossen werden, damit die Erosion nicht überhand nahm und das ganze Gebiet in einen riesigen See verwandelte.

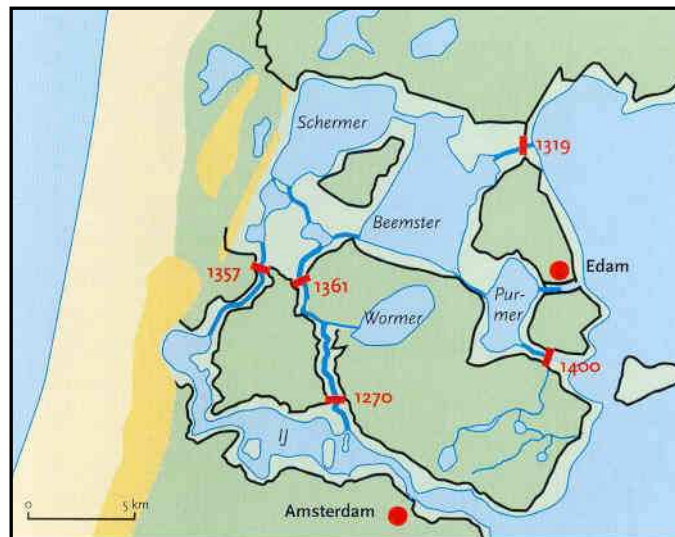


Bild 7 Abtrennung der grossen Seen mittels Dämmen von der Zuiderzee (14./15. Jh.). Die einzige offene Verbindung zur Zuiderzee lag bei Edam [34]

Auch vor dem Meer aus Westen versuchte man sich zu schützen, indem man die Sanddünen mit Strandhafer bepflanzte, um Verwehungen zu verhindern.



Bild 8 Dünenbepflanzung heute [Foto L. Frossard]

Die Entwässerung der Moore wurde bis ins 15. Jahrhundert immer mühsamer, weil der Boden – und somit auch das abzuführende Wasser – immer weiter absank. Bis zu dieser Zeit konnte man nämlich nur dann entwässern, wenn der Wasserstand in den Entwässerungsgräben des Polders höher war als derjenige des ausserhalb liegenden Auffanggewässers. Die Zeitperiode, in der dieser Zustand zutraf, schrumpfte mit dem Absinken des Bodens auf den Sommer zusammen, bis schliesslich auch dann kaum noch Wasser abgeführt werden konnte. Zum Glück kam man dann auf die Idee, dass man eine



Windmühle auch mit einem Schöpfgrad versehen und damit das Wasser auch hinauf befördern kann [34]. Windmühlen kannte man im Land bereits, doch man benützte sie zu herkömmlichen Zwecken wie z.B. das Mahlen von Getreide. Diese Wind-Wasser-Mühlen wurden bald Poldermühlen genannt und verbreiteten sich schnell im ganzen Gebiet, obwohl der Bau sehr teuer war (im heutigen Geldwert ca. 600'000 €). Mit diesem neuen, wichtigen Hilfsmittel wollte man die verschiedenen Binnenseen trockenlegen.

Bild 9 Poldermühle [Foto L. Frossard]

Das erste Projekt war 1533 ein 40 Hektaren „kleiner“ See südlich von Alkmaar. Darauf folgten 1564 zwei grössere Seen in der Region von Alkmaar von je etwa 6,5 km<sup>2</sup> Fläche. Das 17. Jahrhundert war Hollands „Goldenes Jahrhundert“, d.h. Wohlstand und Innovation waren sehr gross. Auch die Bevölkerung in den Städten wuchs, sodass mehr Nahrung nötig war. So schlossen sich reiche Kaufleute zusammen und investierten viel Geld in die Trockenlegung grösserer Seen [34]. Neben den immer höheren Unterhaltskosten für die Deiche war auch der hohe Kornpreis ausschlaggebend. Das erste grosse Projekt war der Beemster (71 km<sup>2</sup>), welcher 1612 nach mehreren Rückschlägen, sprich Überflutungen, trockengelegt wurde [12]. Es folgten weitere Projekte, welche eine Gesamtfläche von etwa 79 km<sup>2</sup> Land erbrachten. Als vorläufiger Abschluss wurde der 47,6 km<sup>2</sup> grosser Schermer 1635 entwässert [19].



Bild 10 Der Schermer vor der Trockenlegung [Postkarte]

Bereits zu dieser Zeit hatte man Pläne, um das 181 km<sup>2</sup> grosse Haarlemmermeer („meer“ = See) südlich von Amsterdam trockenzulegen. Doch dieses Vorhaben schien dann doch technisch, organisatorisch und finanziell zu hoch stehend. Erst als man im 19. Jahrhundert über mit Dampf angetriebene Pumpwerke („gemalen“) verfügte, konnte man das Haarlemmermeer 1852 trockenlegen. Schlussendlichen Anlass dazu gab ein Sturm, der den See im Herbst 1836 über die Ufer treten liess. Die beiden grossen Städte Amsterdam und Leiden waren davon betroffen, deshalb wurde das Vorhaben genehmigt. Hier stand vor allem der Schutz des umliegenden Landes im Vordergrund und nicht die Gewinnung von Neuland [34].

Die grosse Tat des 20. Jahrhunderts war die Eindeichung der Zuiderzee. Den Beschluss dazu fasste die Regierung nach einer schweren Sturmflut 1916. Am 28. Mai 1932 wurde das letzte Stück des Afsluitdijk geschlossen und das IJsselmeer entstand. Zwei Jahre vorher war auch noch der Wieringermeerpolder entstanden. Auch dem IJsselmeer wurde noch Land abgetrotzt. 1942 war der Noordoostpolder (480 km<sup>2</sup>) trocken. Bis heute sind noch zwei weitere Polder entstanden, und zwar Oostelijk Flevoland (540 km<sup>2</sup>) 1957 und Zuidelijk Flevoland (430 km<sup>2</sup>) 1968.

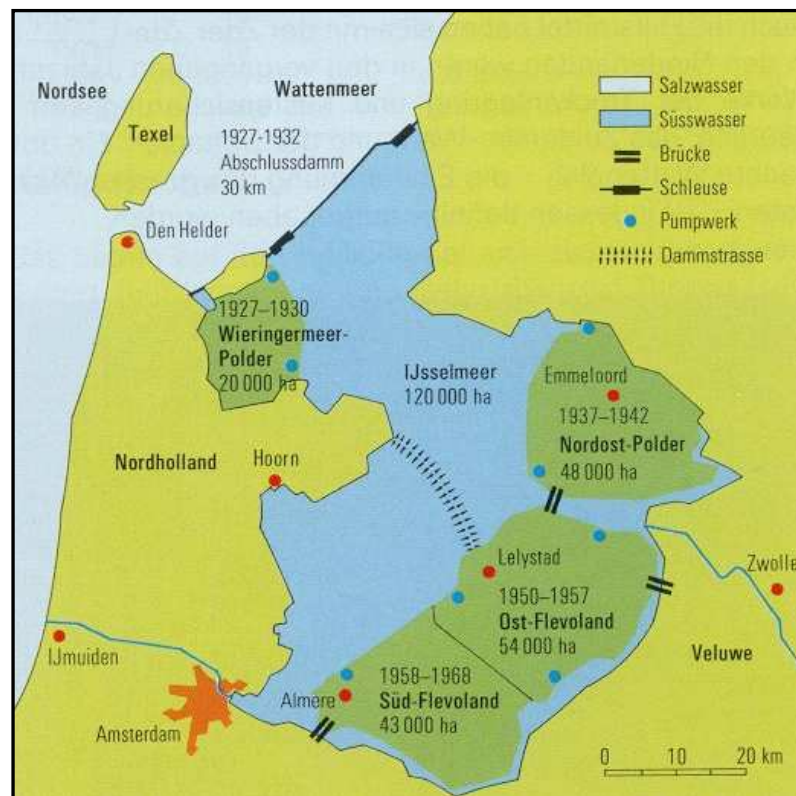


Bild 11 Karte der eingedeichten Zuiderzee [1]

Für diese Entwässerungen hatte man allerdings bessere Hilfsmittel als Windmühlen zur Verfügung – die Pumpwerke wurden elektrisch oder mit Diesel angetrieben. Der Markerwaard (410 km<sup>2</sup>) sollte ursprünglich auch noch trockengelegt werden, doch in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts dachte man vermehrt auch an den Naturschutz und an das kostbare Süsswasser im IJsselmeer. Da

auch kein dringendes Bedürfnis nach neuem Land vorhanden war, schob man den Entscheid vorläufig hinaus. 1991 hat sich die Regierung dann endgültig entschieden, den Markerwaard nicht einzupoldern.

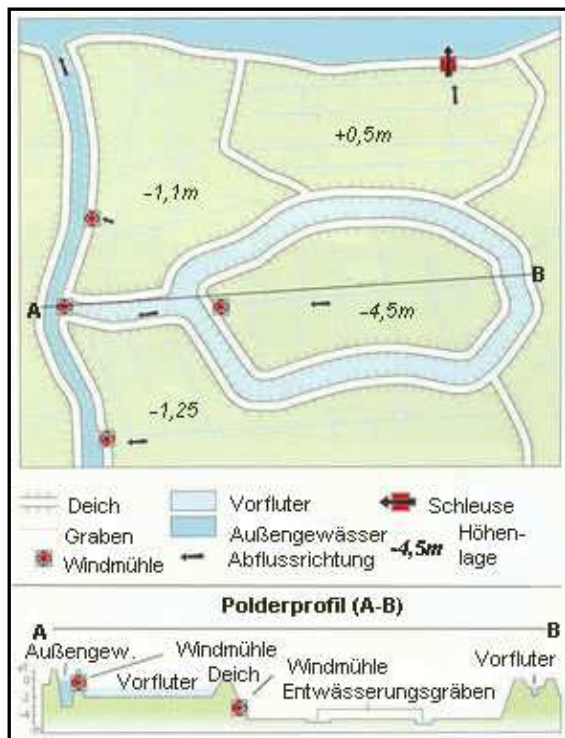
### 3.3 Funktionsweise

#### 3.3.1 Entwässerungssystem

Schon bei den ersten Urbarmachungen entwässerte man den Boden, indem man in regelmässigen Abständen Entwässerungsgräben („sloten“) grub. Diese wurden dann vom Wasser aus den nassen Moorböden gefüllt, denn das Wasser sucht sich im Boden immer den Weg mit dem kleinsten Widerstand.

Gleichzeitig bildeten die Entwässerungskanäle die Grenzen zwischen den Grundstücken. Es galt die Regel, dass eine Parzelle 95-115 m breit und 1250 oder 2300 m lang war.

Um das Land vor dem Wasser aus den höher gelegenen, nicht urbar gemachten Moorgebieten zu schützen, baute man an der Grenze einen weiteren Entwässerungskanal, an dessen Innenseite eine Art Damm („kade“) errichtet wurde. Zu Beginn genügten die Abstände zwischen den Entwässerungsgräben für die Entwässerung der Moorböden, doch wenn das Gebiet einmal entwässert war, mussten sie oft verbreitert werden. Das Wasser der Entwässerungsgräben wurde durch sehr einfache Schleusen nach aussen geführt, welche aus einem Tor bestanden, das nur von innen her vom Wasser geöffnet werden konnte, wenn der Wasserstand ausserhalb des Polders tiefer war als innerhalb.



Auch wenn diese Art der Entwässerung wie im Kapitel Landgewinnung (3.2) beschrieben auf die Dauer nicht erfolgreich war, so blieb doch das Prinzip mit den Entwässerungsgräben bis heute erhalten. Mit Hilfe der Windmühlen konnte man das Wasser seit dem 15. Jahrhundert um 1-1,5 m hinauftransportieren. Das Wasser gelangte aus den Entwässerungsgräben mit Hilfe der Windmühlen in einen Vorfluter („boezem“), welcher je nachdem ein anderer Entwässerungsgraben, ein Teich oder ein grösserer See war. Von dort aus wurde es durch eine Windmühle in das Aussengewässer (See oder Kanal) gepumpt.

Bild 12 Aufbau eines Polders (schematisch) [28]



Die Windmühlen, die man für Korn brauchte, wurden für die Entwässerung der Polder weiterentwickelt, d.h. mit einem Schöpfrad versehen. Die Turmmühlen wurden zu den achteckigen Poldermühlen (siehe Bild 9), deren Wände mit Schilf bedeckt sind. Der oberste Teil des Gebäudes kann von innen her gedreht werden, sodass die Flügel immer in den Wind gerichtet sind.



Bild 13 Poldermühle. Innenansicht (a) und Aussenansicht (b) der Wände aus Schilf [Fotos L. Frossard]

### 3.3.2 Von der Einzelmühle zum Mühlengang

Eine Zeit lang funktionierte mit diesen Windmühlen alles bestens – bis der Boden weiter abgesunken war, sodass der von den Mühlen zu überbrückende Höhenunterschied zwischen dem Polder und dem Aussengewässer zu gross wurde. Doch für dieses Problem gab es bald eine Lösung: Man liess mehrere, auf verschiedenen hohen Niveaus stehende Mühlen hintereinander mahlen. Die unterste Mühle hob das Wasser in den unteren Vorfluter, von dort brachte es die mittlere Mühle in den mittleren Vorfluter, bevor die oberste Mühle es ins Aussengewässer transportierte.

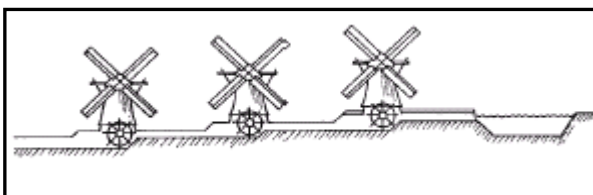


Bild 14 Mühlengang (schematisch) [31]

Mit dieser Methode des Mühlenganges wagte man sich an die Trockenlegung der Seen. Dazu grub man um das Seeufer einen so genannten Ringkanal aus und deponierte das Aushubmaterial beidseits des Grabens als Deiche. Nun baute man

vorerst die obersten Mühlen der späteren Mühlengänge auf, welche das Wasser aus dem See in den Ringkanal beförderten. Mit Absinken des Seespiegels wurde der Mühlengang nach und nach vervollständigt. Nach der Trockenlegung des Sees zog man ein Netz von Entwässerungskanälen („tochten“ und „vaarten“), welche das Wasser zu den Mühlengängen führten. Rechtwinklig dazwischen grub man schliesslich noch Entwässerungsgräben.

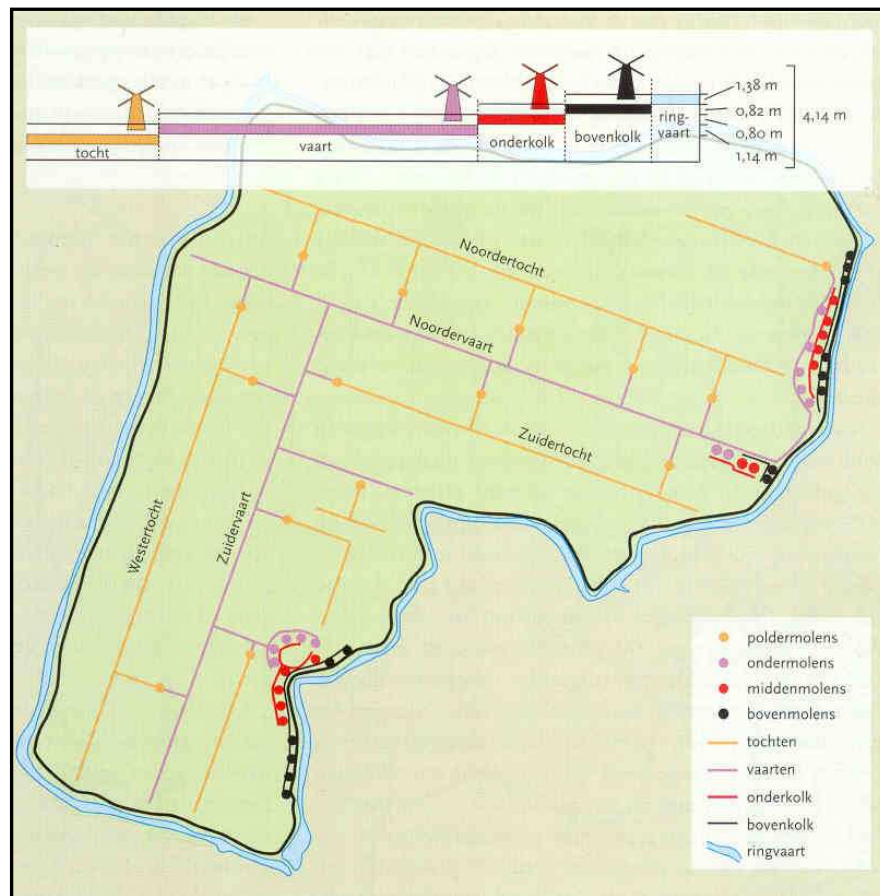


Bild 15 Polderschema Schermer [34]

Damit das Land trocken blieb, mussten die Windmühlen auch nach der Trockenlegung in Betrieb bleiben. Der Wasserstand im Polder konnte auf diese Weise unter Kontrolle gehalten werden. Im 19. Jahrhundert wurden die Schöpfräder der Mühlen nach und nach durch archimedische Schrauben ersetzt. Weil damit das Wasser 4-5 m hoch hinaufbefördert werden konnte, sank die Anzahl benötigter Mühlen für eine bestimmte Leistung und somit sanken auch die Kosten, zumal die Kapazität der Schraubemühlen mit  $75 \text{ m}^3 \text{ Wasser/min}$  grösser war als diejenige der Schöpfradmühlen ( $55 \text{ m}^3/\text{min}$ ) [34].

Ein Nachteil der Windmühlen war ihre Windabhängigkeit, d.h. sie waren nur etwa einen Viertel von der möglichen Zeit in Betrieb. Die Windgeschwindigkeit musste 6-11 m/s betragen; war sie kleiner, drehten die Mühlen nicht genügend stark, war sie grösser, konnte die grosse Reibung zu Bränden führen [34].

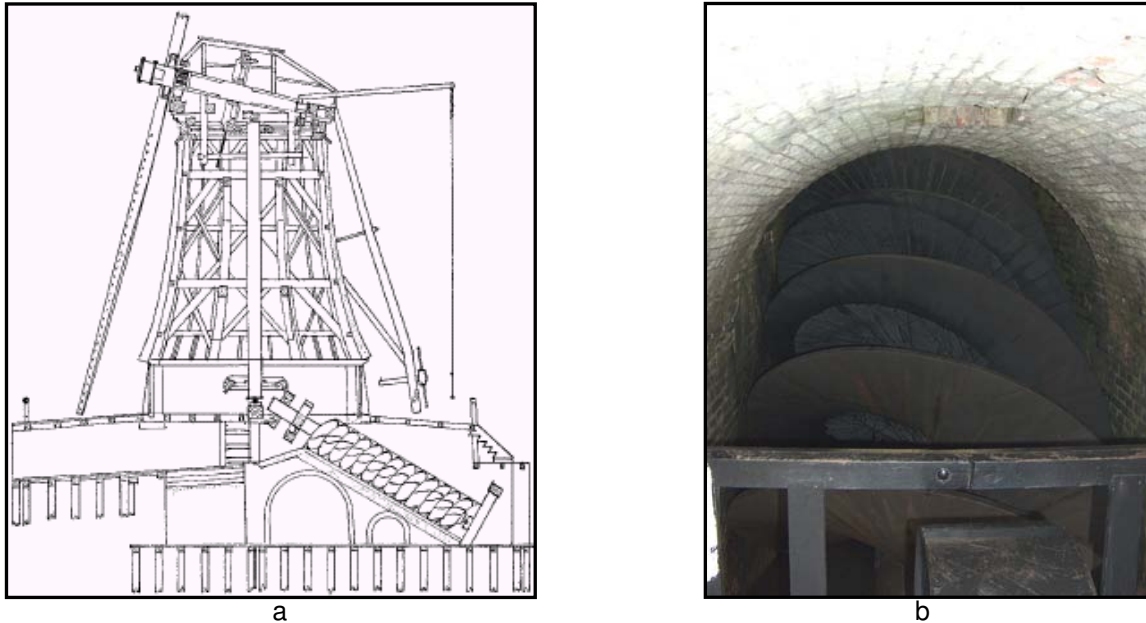


Bild 16 a. Querschnitt einer Mühle mit Archimedesschraube [31] und b. Archimedesschraube in bestehender Mühle [Foto L. Frossard]

### 3.3.3 Von der Dampfkraft zur Gegenwart

Mit dem Aufkommen der Dampfmaschine wurden die Windmühlen ersetzt. Vor allem die relativ leichtgewichtige, liegende Dampfmaschine erwies sich für die schwachen Böden der Polder als sehr geeignet. Nachdem bereits seit 1835 erste Dampfpumpwerke verwendet wurden, war die Entwicklung der Dampfmaschine um 1850 abgeschlossen. Später wurden noch Verbesserungen gemacht, v.a. im Material, was eine Steigerung des Wirkungsgrades zur Folge hatte.

Neben der Unabhängigkeit vom Wind und der grösseren Leistung war ein weiterer Vorteil der Dampfpumpwerke, dass die Tourenzahl geregelt und somit das Wasser einfacher auf einem konstanten Pegel gehalten werden konnte. Nachteile gab es auch: Eine Dampfmaschine war teuer, zudem brauchte es viel Zeit, um sie betriebsbereit zu machen. Geheizt wurden die Dampfmaschinen mit Kohle, Öl oder früher mit Torf. Man war also von diesen Rohstoffen abhängig.

Nachdem in Deutschland 1897 der Dieselmotor entwickelt worden war, wurde dieser 1904 erstmals in einem niederländischen Pumpwerk eingesetzt. Die Leistung war eindeutig grösser und auch die schnellere Betriebsbereitschaft war eine grosse Verbesserung gegenüber den Dampfmaschinen. Weil der Dieselmotor ein Explosionsmotor ist, musste er auf einem stabilen Fundament stehen. Dies, sowie der grosse Platzbedarf der Öltanks wurde als Nachteil empfunden. Trotzdem ist der Zuidelijke Flevo-polder mit Dieselpumpwerken trockengelegt worden.

Etwa zur gleichen Zeit kam auch der Elektromotor auf. In der Provinz Noord-Brabant, wo man als erstes elektrische Pumpwerke benutzte, wurden die Pumpen mit einem Schwimmer versehen. Wenn der Wasserstand und somit auch die Pumpe auf ein bestimmtes Niveau gestiegen waren, wurde automatisch der Motor eingeschaltet. Die Vorteile des elektrischen Pumpwerkes liegen auf der Hand: Die Energiezufuhr ist sehr praktisch, sie können auch an Orten stehen, die nicht gut mit Öl oder Kohle erreicht werden können. Zudem ist der Motor relativ klein, sodass ein Häuschen mit leichten Fundamenten genügt.



Zum Einschalten muss man nur an einem Knopf drehen, die Tourenzahl kann jedoch kaum geregelt werden. Ein weiterer Nachteil ist die Abhängigkeit vom Elektrizitätsnetz.

Anfangs durfte während der „Stosszeiten“ nicht gepumpt werden, um das Stromnetz nicht zu überlasten. Heute wird meistens am Wochenende oder in der Nacht gepumpt – wegen der niedrigeren Tarife.

Bild 17 Im Pumpwerk „Wilhelmina“ [Foto L. Frossard]

Die Modernisierung nahm weiter ihren Lauf, indem ab den 1950ern zunächst kleinere Pumpwerke automatisiert wurden. Seit etwa 1980 werden mehrere Pumpwerke in einer Zentrale über einen Kontrollschirm bewacht – es braucht also nicht einmal mehr *eine* Person pro Pumpwerk!



Bild 18 Modernes Pumpwerk [Foto L. Frossard]

Was im früheren Landschaftsbild der Niederlande die Windmühlen waren, sind heute die weissen, auf einem Stab ruhenden Windturbinen, wie sie auch bei uns auf dem Mont Crosin zu finden sind. Der damit gewonnene Strom wird gebraucht, um die elektrischen Pumpwerke anzutreiben – man ist also für die Bemahlung der Polder wieder zur Windenergie zurückgekehrt!



Bild 19 Windturbinen [Foto L. Frossard]

### 3.4 Bodenbeschaffenheit und Grundwasser

Die Böden der Polder bestehen grundsätzlich aus maritimen Tonablagerungen, Sand und Moorboden. Je nach Ort liegt eine andere Schicht an der Oberfläche. Als nach der letzten Eiszeit die Nordsee noch mehr oder weniger trocken war, hatte der Wind freien Spielraum. Diesen nutzte er, um das Gebiet der heutigen Niederlande mit Sand zu bedecken. Auf dieser Sandschicht entstand wegen des steigenden Grundwasserspiegels eine erste dünne Moorschicht bevor der ansteigende Meeresspiegel dazu führte, dass eine natürliche Bodenerhöhung durch Ablagerung von Meeressand und Ton einsetzte. Diese Ablagerungen entstanden im Zeitraum zwischen 6000 v. Chr. und 2750 v. Chr. Dann kam es wieder zur Moorbildung wie es im Abschnitt Landgewinnung beschrieben wurde, doch wenn das Meer zwischen- durch wegen einer Lücke in den Dünen wieder Zugang erhielt, entstand eine neue Tonschicht [14].

Nach der Urbarmachung wurde der Moorboden abgebaut, sodass heute der oberste Teil des Bodens vielerorts aus einer einige Meter dicken Schicht von blauem Meereston besteht, wobei die blaue Farbe meist in den obersten 20 cm besonders ausgesprochen zum Vorschein kommt. Von Westen nach Osten liegt diese Schicht immer tiefer unten, in Enkhuizen am IJsselmeer liegt sie ungefähr 8 m unter der Oberfläche. Darunter liegt eine dicke Schicht Wattsand [14].

In dieser Art von Boden konnte sich ein spezielles Grundwassersystem entwickeln. So befindet sich das Grundwasser, dessen Spiegel in den Poldern relativ hoch ist, in oder zwischen den Sand-, Ton- und Moorschichten im Boden. Dabei sind die unteren Schichten völlig mit Wasser gesättigt, die oberen nicht. Durch Ton- und Moorschichten fließt das Wasser viel mühsamer als durch Sand, weshalb die Polder ohne erstgenannte Schichten nicht hätten entwässert und trocken gehalten werden können. Das Grundwasser würde sonst schnell aufsteigen und das Land wieder mit Wasser bedecken [15]. Das meiste Grundwasser ist Niederschlagswasser, das im Boden gespeichert bleibt. Wegen der Nähe zum

Meer ist es leicht salzig. Wenn es absinkt wird es gereinigt – dies ist vor allem in den Sandböden der Dünen der Fall, sodass diese seit vorletztem Jahrhundert als Trinkwasser“quelle“ verwendet werden [23].

Mit der Zeit sank aber der Grundwasserspiegel, feuchte Dünentäler trockneten aus und besondere Pflanzen- und Tierarten verschwanden. Um 1930 merkte man, dass der Wasservorrat in den Dünen abgenommen hatte. Nun begann man Flusswasser in die Dünen zu leiten, dort versickern zu lassen und dann als gereinigtes Trinkwasser wieder hinaufzupumpen. Das Flusswasser war aber stark verschmutzt, was bewirkte, dass die Dünenböden nährstoffreicher wurden und daher seltene Orchideen gewöhnlichen Pflanzenarten wie Brennnesseln Platz machen mussten. Aus diesen Gründen ist man seit kurzem daran, das Wasser erstens besser vorzureinigen und zweitens in 50-70 m tiefe Schächte hinunterzulassen und in einiger Entfernung auch aus solcher Tiefe wieder hinaufzupumpen, damit der Boden, auf dem die Pflanzen wachsen, nicht beansprucht wird [22].

Der Grundwasserspiegel in den Poldern ist relativ hoch. Wenn dies aber nicht so wäre, würden untiefe Flüsse und Seen trocken stehen und es gäbe keine nassen Naturschutzgebiete [23].

### 3.5 Nutzung und Bedeutung

Weil der Ton in den gemässigten Breiten Nährstoffionen sehr gut bindet, gilt er als sehr fruchtbar.

Deshalb ist die Provinz Noord-Holland ein intensiv genutzter Raum. Wichtigste Nutzungsart ist dabei die Landwirtschaft mit rund 60% des zur Verfügung stehenden Bodens (ganze NL: ca. 66%). Trotzdem ist die Besiedlung recht hoch, weist doch Noord-Holland die zweitgrösste Provinzbevölkerung auf. Auf knapp einem Zehntel der Fläche der ganzen Niederlande lebt rund ein Siebtel der Bevölkerung. Somit ist die Einwohnerzahl pro Quadratkilometer mit 640 etwa 3,5-mal so gross wie in der Schweiz (ganze NL: 468 Einwohner pro km<sup>2</sup>).



All diese Leute möchten sich natürlich auch in der Natur aufhalten können, sodass es staatlich verordnete Erholungsgebiete gibt, die nicht bebaut werden dürfen. Dazu zählen auch die Dünen, welche von vielen Wander- und Velowegen durchzogen sind.

Gleichzeitig sind die Dünen aber auch ein Naturschutzraum, da die Wege nicht verlassen werden dürfen.

Bild 20 Dünenlandschaft [Foto L. Frossard]

In den Poldern gibt es auch Naturschutzgebiete, doch dort kommt es manchmal zu Konflikten mit der Landwirtschaft. Für die Natur ist es besser, wenn die Felder im Frühling eher nass sind, was für die Landwirte aber nicht brauchbar ist. Die Ufer der Ringkanäle und häufig auch diejenigen der Entwässerungskanäle sind mit Schilf bewachsen, damit Wasservögel besser Schutz finden. Die Polder sind jedoch auch sehr gut geeignet für Velotouren, da es auf den Nebenstrassen nicht viel Verkehr hat.



Bild 21 Velofahrer auf einem Deich [Foto L. Frossard]

Dies ist jedoch eigentlich nur ein willkommener Nebeneffekt, denn in den Poldern wird sehr intensive Landwirtschaft betrieben, am häufigsten Milchwirtschaft. Im Ackerbau sind die wichtigsten Produkte Kartoffeln, Weizen, Zuckerrüben, Gemüse und seit kürzerer Zeit auch Mais. Das Gemüse wächst auch häufig in Gewächshäusern. Daneben werden auf den sandigen Böden am Rand der Dünen Blumenzwiebeln und Schnittblumen gezüchtet.

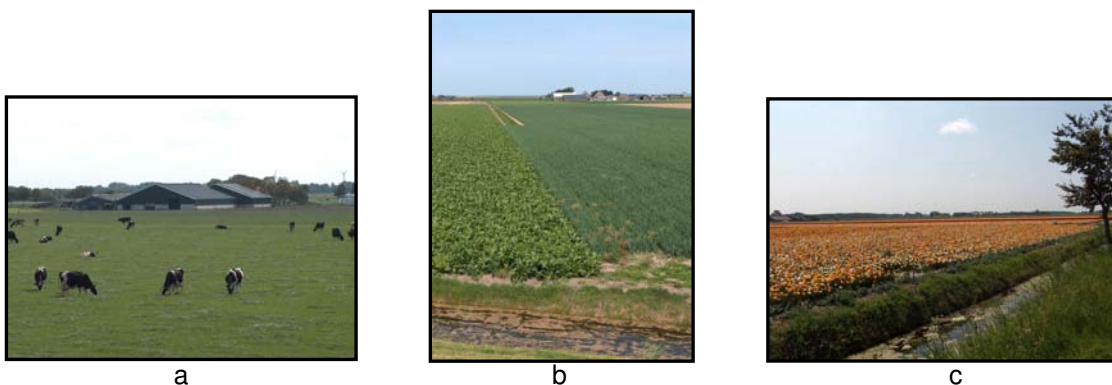


Bild 22 Landwirtschaft. a. Milchwirtschaft; b. Ackerbau; c. Schnittblumen [Fotos L. Frossard]

Aufgrund der intensiven Bewirtschaftung ist das Wasser der Entwässerungsgräben und -kanäle sehr nährstoffreich, sodass sich gewisse Wasserpflanzen stark ausbreiten. Dies ist oft schön anzusehen, für die Artenvielfalt jedoch nicht förderlich. Markant sind die völlig von Wasserlinsen bedeckten Entwässerungsgräben.



Bild 23 Entwässerungsgraben mit Wasserlinsen [Foto L. Frossard]

Die Tier- und Pflanzenwelt in einem Polder ist deshalb oft mehr oder weniger einseitig. Typisch sind Watvögel wie Rotschenkel, Uferschnepfe oder Regenbrachvogel.

Schliesslich bleibt noch zu erwähnen, dass mit Amsterdam Schiphol ein grosser internationaler Flughafen im Haarlemmermeerpolder und somit unter dem Meeresspiegel angesiedelt ist.

Man sieht, dass die Polder von Noord-Holland sowohl einen bedeutenden Beitrag an die exportorientierte Landwirtschaft der Niederlande liefern, wie auch Wohnregion vieler Leute sind.

## 4 Auswirkungen der Klimaänderung auf das Poldersystem

### 4.1 Klimaänderung in den Niederlanden

Wie Messungen des KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) zeigen, wird es in den Niederlanden auch wärmer. Auffallend an den Statistiken ist, dass vor allem die Frühlinge und – in kleinerem Masse – die Winter massiv wärmer geworden sind. Dafür sind häufigere (Süd)westwinde verantwortlich, welche milde und feuchte Luft nach Europa bringen [6].

Ob solche Winde in einem Winter häufig sind oder nicht, hängt von der nordatlantischen Oszillation (NAO) ab. Darunter versteht man die Schwankungen des Druckunterschieds zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief im Winter. Wenn diese Druckdifferenz grösser ist als im Mittel, wie es in den letzten 30 Jahren meistens der Fall war (positiver sog. NAO-Index), treffen die milden und feuchten Westwinde auf Nordeuropa. Ist die Differenz zwischen den beiden Druckzentren klein (negativer NAO-Index), verlaufen die schwächeren Westwinde weiter südlich im Mittelmeerraum, während im nördlichen Teil Europas sibirische Kaltluft für trockene und kalte Winter sorgt.



Der Zusammenhang der nordatlantischen Oszillation mit der Klimaänderung ist unbestritten, obwohl die Ursache der NAO noch nicht genau geklärt ist. Es könnte sein, dass sie durch die Abkühlung der Stratosphäre beeinflusst wird, deren Ursachen die Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht sowie der Treibhauseffekt sind (oberhalb der Treibhausgasschicht wird es kälter wenn die Wärme darunter bleibt) [26].

Im Weiteren hat man seit 1901 eine Zunahme des durchschnittlichen Winterniederschlags festgestellt (Oktober-März), während sich der Durchschnitt des Sommerhalbjahres nicht gross verändert hat. Es ist aber nicht nur die Gesamtmenge des Niederschlages, welche zugenommen hat; die Messdaten beweisen, dass der Anteil des Niederschlages der nassesten Tage des Jahres an der Gesamtmenge im 20. Jahrhundert gewachsen ist. Zusammen mit der Tatsache, dass die Anzahl Tage mit viel Regen zugenommen hat, scheint der Beweis, dass der Niederschlag extremer wird, erbracht zu sein. Die Anzahl Stürme pro Jahr im Land hat in den letzten 41 Jahren abgenommen [6].

Anhand des IPCC-Berichtes 2001 stellte das KNMI im November desselben Jahres für 2100 folgendes Klimaszenario auf:

Tabelle 2 Klimaszenario des KNMI für 2100 [6]

Bemerkungen: Das jährliche Maximum der zehntägigen Winterniederschlagssumme soll die Intensität extremer Niederschlagsereignisse zeigen. Die Wiederholungszeit der zehntägigen Summe, die heute einem in 100 Jahren vorkommt, zeigt, dass die Häufigkeit extremer Niederschlagsereignisse zunehmen wird. Die Werte für die Meeresspiegelsteigerung sind die relativen Werte für die Niederlande unter Berücksichtigung der Bodensenkung im westlichen Teil des Landes.

	Niedrige Schätzung	Mittlere Schätzung	Hohe Schätzung
Temperaturerhöhung	+ 1°C	+ 2°C	+ 4-6°C
Mittlerer Sommer-niederschlag	+ 1%	+ 2%	+ 4%
Sommerverdunstung	+ 4%	+ 8%	+ 16%
Mittlerer Winter-niederschlag	+ 6%	+ 12%	+ 25%
Jährliches Maximum der zehntägigen Winterniederschlags-summe	+ 10%	+ 20%	+ 40%
Wiederholungszeit der zehntägigen Summe, die heute einmal in 100 Jahren vorkommt (>140mm)	47 Jahre	25 Jahre	9 Jahre
Meeresspiegelanstieg	+ 20 cm	+ 60 cm	+ 110 cm

## 4.2 Technische Auswirkungen

Zwecks Veranschaulichung gewisser Auswirkungen der Klimaänderung auf die Polder habe ich ein einfaches Modell eines Polders entworfen. Dieser liegt etwa bei Heerhugowaard in der Mitte der Provinz Noord-Holland, grenzt also nicht direkt ans Meer oder ans IJsselmeer. Der Polder habe folgende Eigenschaften:

- Oberfläche ohne Ringkanal: 60 km<sup>2</sup>
- Oberfläche der Entwässerungskanäle: 1.8 km<sup>2</sup> (Ein solcher Anteil von 3% der Gesamtoberfläche wäre sinnvoll, wird in einigen Poldern Noord-Hollands aber niemals erreicht [34].)
- Bebaute Oberfläche: 6 km<sup>2</sup> (vorwiegend Landwirtschaftsgebiet, Industriebetriebe finden sich nicht in grossem Rahmen)
- Grundwasserpegel: knapp 30 cm unter der Bodenoberfläche
- Kapazität der Pumpwerke: 625 m<sup>3</sup>/min (Damit kann in 24 Stunden 15 mm Regen abgepumpt werden, was in den meisten Poldern Noord-Hollands üblich ist. Auf die Anzahl Pumpwerke kommt es nicht so an, schätzungsweise sind es drei.)
- Als Klimadaten für den Modellpolder wurden diejenigen der am nächsten liegenden verfügbaren Station verwendet. Je nachdem wo der Polder genau liegt ist dies Amsterdam oder De Kooy. Weil Amsterdam eine Grossstadt ist (Smog, Überbauung), wurde De Kooy gewählt, das zwar relativ nahe am Wattenmeer, aber in einem offenen Polder liegt.

Tabelle 3 Klimadaten Station „De Kooy“ (1971-2000) [21]

De Kooy 0 m ü. M.			
	Niederschlag [mm]	Temperatur [° C]	Evapotranspiration [mm]
Januar	64.4	3.2	8.2
Februar	39.6	3.0	16.0
März	53.8	5.2	34.6
April	34.9	7.6	58.8
Mai	41.9	11.6	89.6
Juni	53.2	14.2	95.6
Juli	55.5	16.6	98.9
August	60.0	16.9	85.5
September	86.6	14.5	51.0
Oktober	90.1	11.0	27.2
November	91.9	7.1	11.0
Dezember	71.0	4.6	6.3
Jahr	742.9	9.6	582.7

### 4.2.1 Wasserkreislauf im Modellpolder

Der Wasserhaushalt im Modellpolder wird im folgenden Schema dargestellt.

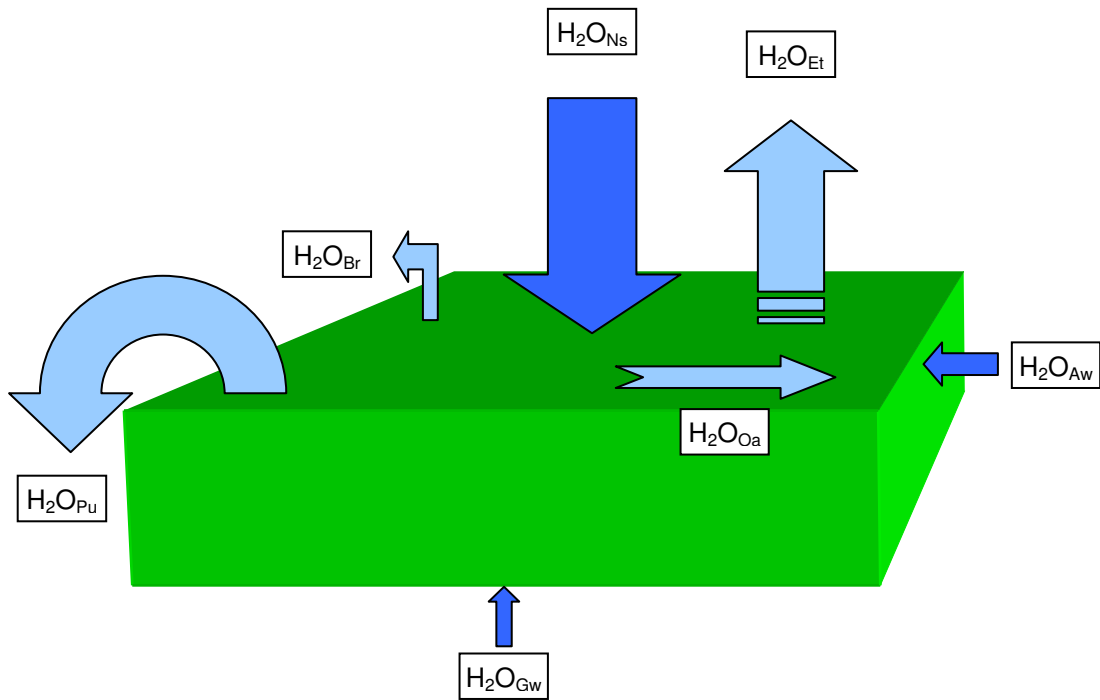


Bild 24 Schema des Wasserhaushalts im Modellpolder [L. Frossard]

Die einzelnen Pfeile bedeuten dabei:

$H_2O_{Ns}$ : Niederschlag

$H_2O_{Aw}$ : Zufuhr aus Aussengewässern

$H_2O_{Gw}$ : natürlicher Grundwasserfluss

$H_2O_{Et}$ : Evapotranspiration (Verdunstung der Gewässer und des Bodens sowie die Transpiration der Pflanzen)

$H_2O_{Oa}$ : Oberflächenabfluss; Annahme: keine Flussabfuhr

$H_2O_{Br}$ : Brauchwasser (Trinkwasser, Haushalte und Industrie)

$H_2O_{Pu}$ : Wasser, das aus dem Polder gepumpt wird

Die Zufuhr aus den Aussengewässern erfolgt im Sommer meist gezielt aus den Aussengewässern (Vorfluter, IJsselmeer, Markermeer), damit der Grundwasserspiegel im Polder konstant bleibt. In den Sommermonaten ist nämlich die Evapotranspiration grösser als der Niederschlag, sodass das Grundwasser angetastet wird.

Es wird angenommen, dass sich das Wasser im Polder über ein ganzes Jahr hinweg betrachtet in einem Gleichgewicht befindet, d.h. die Summe des zugeführten Wassers muss gleich gross sein wie diejenige des abgeführten Wassers. Daher muss folgende Gleichung gelten:

$$[H_2O_{Gw}] + [H_2O_{Aw}] + [H_2O_{Ns}] = [H_2O_{Oa}] + [H_2O_{Br}] + [H_2O_{Et}] + [H_2O_{Pu}]$$

Annahme: Wasser, das im Polder gebunden ist (in Boden, Vegetation) sei auf beiden Seiten der Gleichung gleich gross, sodass es wegfällt.

#### 4.2.2 Grösseres Regenereignis

Wenn man das Klimaszenario des KNMI rein rechnerisch auf die Klimadaten des Modellpolders anwendet, so kann man selbst beim hohen Szenario nichts Bedrohliches erkennen. Die durchschnittliche Menge Regen pro Tag steigt zwar von 3.89 mm auf 4.5 mm, im Winter gar auf 4.8 mm. Wenn man aber bedenkt, dass die Pumpwerke für 15 mm pro Tag gerüstet sind, sollte sich eigentlich kein Problem ergeben.

Tabelle 4 Niederschlag in De Kooy heute und um 2100 unter der Annahme des hohen Klimaszenarios des KNMI. Der Sommer umfasst die Monate April-September, der Winter Oktober-März. Die Zahl der Regentage wurde für heute und für 2100 angewendet.

	heute			Klimaszenario 2100 hoch	
	Regentage	Niederschlag [mm]	mm/Tag	Niederschlag [mm]	mm/Tag
Sommer	84	332.1	4.0	345.4	4.1
Winter	107	410.8	3.8	513.5	4.8
Total	191	742.9	3.9	858.9	4.5

Diese Annahme ist jedoch falsch, denn es regnet ja nicht jeden Tag gleichviel. Wie schon weiter oben in dieser Arbeit beschrieben, nehmen mit der Klimaänderung extreme Regenereignisse im Winter sowohl in Intensität als auch in Häufigkeit zu.

Als Beispiel wird im Folgenden ein Ereignis, das innert 24 Stunden 50 mm Regen in den Modellpolder bringt, genauer untersucht. Diese Niederschlagsmenge wurde zwischen 1971 und 2000 in De Kooy dreimal an einem Tag erreicht oder überschritten – ist also realistisch.

Tabelle 5 Niederschlagsereignis im Modellpolder: 50 mm in 24 h [L. Frossard]

Ort	Fläche	erhaltene Niederschlagsmenge in 24 h
Offenes Wasser	1.8 km <sup>2</sup>	90'000'000 l = 90'000 m <sup>3</sup>
Bebautes Gebiet	6.0 km <sup>2</sup>	300'000'000 l = 300'000 m <sup>3</sup>
„Offenes“ Land	52.2 km <sup>2</sup>	2'610'000'000 l = 2'610'000 m <sup>3</sup>
Ganzer Polder	60.0 km <sup>2</sup>	3'000'000'000 l = 3'000'000 m <sup>3</sup>

Annahmen:

- Das Brauchwasser (Haushalte und Industrie) werde von ausserhalb des Polders bezogen und gehe nach der Verwendung direkt in die Kläranlage und von dort in den Vorfluter, ohne also je in den Polder zu gelangen.
- Der Niederschlag auf die bebaute Fläche gelange direkt in die Entwässerungsgräben.
- Vom Niederschlag auf die offene Landfläche gelange 35% direkt in die Entwässerungsgräben (Oberflächenabfluss [30]).
- Bei diesem Regenereignis werde die Zufuhr aus den Aussengewässern gestoppt (was üblicherweise auch der Fall ist).
- Der Grundwasserfluss innert 24 Stunden sei vernachlässigbar klein.
- An einem solchen Regentag sei die Evapotranspiration verschwindend klein.

Totale Wassermenge, die nach 24 Stunden im Wassersystem des Modellpolders anfällt

90'000 m <sup>3</sup>	direkter Niederschlag
300'000 m <sup>3</sup>	von bebauter Fläche
913'000 m <sup>3</sup>	Oberflächenabfluss vom „offenen“ Land (35%)
<u>1'303'000 m<sup>3</sup></u>	Gesamtmenge zusätzliches Wasser im Wassersystem des Modellpolders

Mit der heutigen Kapazität der Pumpwerke können in 24 Stunden 900'000 m<sup>3</sup> Wasser abgepumpt werden, d.h. am nächsten Tag befänden sich immer noch 403'000 m<sup>3</sup> Wasser zuviel im Wassersystem des Polders. Nebst der Tatsache, dass das Ackerland durchnässt wäre, würde das Wasser in den Entwässerungsgräben 22 cm höher stehen als sonst.

Wenn am nächsten Tag die Sonne scheint, kann sich die Situation bald wieder normalisieren. Wenn es aber am nächsten Tag weiterhin stark regnet, steigt das Wasser noch höher; der Boden wird noch nasser und je nachdem stehen dann auch die Ackerflächen unter Wasser. Dies dürfte in Zukunft häufig anzutreffen sein, denn mehrere Tage mit intensiven Regen sollen dann keine Seltenheit mehr sein.

### 4.2.3 Mögliche Massnahmen

#### *Vergrösserung der Pumpkapazität*

Was könnte man also tun, damit die Polder nicht ständig unter Wasser stehen? In der durchgeführten Rechnung war die Kapazität des Pumpwerks der begrenzende Faktor. Wenn man mehr Wasser abpumpen könnte, wäre das Problem offenbar gelöst, oder nicht? Technisch gesehen wäre dies schon machbar, man verfügt heute über stärkere Pumpen, es würde einfach mehr Geld kosten. Doch das Vergrössern der Pumpkapazität hat einen Haken: Wohin wird das viele Wasser gepumpt? Der Ringkanal ist Teil des Vorflutersystems mehrerer Polder, in denen es auch viel geregnet hat. In den Vorflutern ist aber zu wenig Platz für eine solche Menge Wasser, sie würden überlaufen und anliegendes Land unter Wasser setzen. Um dies zu verhindern, könnte man zusätzlich die Kapazität der Pumpwerke, die das Wasser aus dem Vorflutersystem in die Nordsee, den Nordseekanal oder das IJssel- resp. Markermeer befördern, erhöhen. Deren Kapazität wurde auf Beginn 2004 zwar vergrössert, doch sie würde

niemals ausreichen, um bei einem grossen Niederschlagsereignis all das Wasser aus den verschiedenen Poldern so schnell abzuführen, dass die Vorfluter nicht überlaufen. Für den Winter könnte man über eine solche technisch höchst anspruchsvolle Kapazitätserhöhung allenfalls noch diskutieren (es regnete in Noord-Holland lokal auch schon 100 mm an einem Tag), doch im Hinblick auf die zukünftigen niederländischen Sommer erweist sie sich als ungünstig. Die Strategie hinter der Kapazitätserhöhung wäre ja, weiterhin alles überschüssige Wasser abzupumpen, doch im Sommer wird in Zukunft nicht mehr regelmässig Wassernachschub geliefert, sodass man ein wenig vorsorgen muss. Im Abschnitt über das IJsselmeer wird darauf näher eingegangen.

Weiter gilt es zu berücksichtigen, dass das Wasser nicht zu jedem Zeitpunkt abgepumpt werden können. Wenn der Pegel des IJsselmeers v.a. im Winter sehr hoch ist, verträgt er eine zusätzliche Erhöhung nicht mehr, sodass das Wasser in den Vorflutern bleiben muss, um die ans IJsselmeer angrenzenden Gebiete nicht zu gefährden.

Die Vergrösserung der Pumpkapazität ist also keine gute Lösung.

#### *Vergrösserung der Vorfluter*

Eine weitere Möglichkeit zur Entschärfung der Wassersituation wäre, das Volumen der Vorfluter zu vergrössern, damit das Wasser dort längere Zeit zwischengelagert werden kann. Die Vorfluter sind jedoch meist von Infrastruktur wie z.B. Brücken und Strassen umgeben, die im Falle einer Vergrösserung verschoben werden müssten. Zusätzlich wohnen die Leute zum Teil auch entlang des Ringkanals. Da eine Volumenvergrösserung nicht nur in die Tiefe erfolgen kann, weil sonst die Stabilität des Deiches gefährdet ist, wird das vergrösserte Vorflutersystem mehr Fläche in Anspruch nehmen. Die umliegenden Bauwerke müssten somit alle verschoben oder neu gebaut werden – ein Vorhaben, für das einerseits die betroffene Bevölkerung kaum zu gewinnen ist, und das andererseits einen enormen Geldaufwand erfordert.

#### *Erhöhung der Wasserspeicherkapazität*

Eine bessere Idee wäre die Erhöhung des Wasserspeichers im Polder selbst. Natürlich müsste auch hier Landfläche „geopfert“ werden. Wegen des hohen Grundwasserspiegels ist eine Vertiefung der Entwässerungsgräben nicht unbegrenzt möglich, also müssten sie verbreitert werden. Weil man nicht unbedingt denjenigen Entwässerungskanal verbreitern müsste, der zwischen einer Häuserreihe und einer Strasse liegt, müsste die Landwirtschaft Einbussen hinnehmen.

Wie ein Mitarbeiter eines Pumpwerks bei Schermerhorn erklärte, musste man früher wegen der kleineren Pumpkapazität mit dem Abpumpen bereits beginnen bevor es regnete. Diese flexiblere Handhabung des Pegels könnte man in Zukunft bei starken Regenfällen wieder anwenden. Wenn eine Trockenperiode bevorsteht, würde der Pegel hoch gelassen. Oder man könnte das ganze umdrehen. Wenn es stark regnet, lässt man das Wasser vorerst bis zu einer gewissen Höhe ansteigen bevor man mit dem Abpumpen beginnt. Bei Trockenheit muss der Pegel zuerst wieder sinken, bevor es nötig wird, Wasser in den Polder hineinzulassen. Auf die Landwirtschaft wirkt sich eine solche Handhabung allerdings nachteilig aus, die Felder wären eine Zeit lang zu nass und dann wieder zu trocken, was den Ertrag vermindert.

#### 4.2.4 Paradox: „Trockenheit“ im Polder

Nicht nur ein Zuviel an Wasser, wie es vor allem im Winter der Fall sein wird, führt zu Problemen in den Poldern, ein Zuwenig an Wasser tut dies genauso. Wenn heute im Sommer der Wasserpegel im Polder sinkt, weil mehr Wasser verdunstet als es regnet, wird meistens von aussen Wasser in den Polder gelassen, damit der Pegel etwa konstant bleibt. Dies ist für die Landwirtschaft sehr wichtig, denn sonst vertrocknen die Gewächse. Zudem wird manchmal auch Wasser von aussen geholt, um dreckige oder versalzte Wasserläufe durchzuspülen. Da man für diese Zwecke Süßwasser benötigt, muss dieses Wasser fast zwingend aus dem IJssel- oder Markermeer kommen, denn sonst gibt es kein so grosses Süßwasserreservoir in und um Noord-Holland. Das Trinkwasser aus den Dünen möchte man für diese Zwecke nicht antasten. In Zukunft dürfte aber nicht mehr in so grossem Masse Wasser hereingelassen werden können, weil sich der Wasserhaushalt des IJsselmeers auch verändern wird (siehe 4.2.5).

##### *Auswirkung auf Deichfestigkeit*

Im Sommer 2003 haben die Polder bereits ein Münsterchen der Klimaänderung erleben können. Dieser Sommer war aber insofern „nur“ abgeschwächt als dass es erst ab Juni trocken und heiss war. Im Mai hatte es noch die normale Menge geregnet, womit in Zukunft nicht mehr unbedingt zu rechnen ist. Deshalb gab es 2003 keine ernsthaften Süßwasserprobleme, bei längeren Trockenperioden dürften solche aber eintreten, zumal der Bedarf an Süßwasser zunehmen wird.

Trotz der Tatsache, dass der Sommer 2003 also nicht so extrem war, trat ein für die Niederlande neues Phänomen auf: Wegen der Trockenheit brach in Wilnis in der Provinz Utrecht der Deich des Ringkanals auf einer Länge von 60 Metern durch, sodass sich der Ringkanal beinahe entleerte.



Ein ganzes Quartier des Dorfes wurde getroffen, d.h. mit einer Schicht aus Schlamm und Wasser bedeckt, und zwar auch in den Häusern. Das Wasser stand teilweise bis zu einem halben Meter hoch. Hausboote auf dem Ringkanal kamen ins Trockene zu liegen und erlitten Schäden. Insgesamt mussten etwa 1500-2000 Menschen evakuiert werden.

Bild 25 Deichbruch in Wilnis [16]

Der Deich bestand, wie 250 km weitere Deiche in Noord-Holland, überwiegend aus Torf, welcher Wasser gleich einem Schwamm aufsaugt. Während der langen Trockenperiode trocknete er aber aus und schrumpfte zusammen, sodass er einerseits an Gewicht verlor und andererseits horizontale Verformungen zu Rissen und Spannungen im Deichinnern bis in die gesättigte Zone hinunter führten. Daher

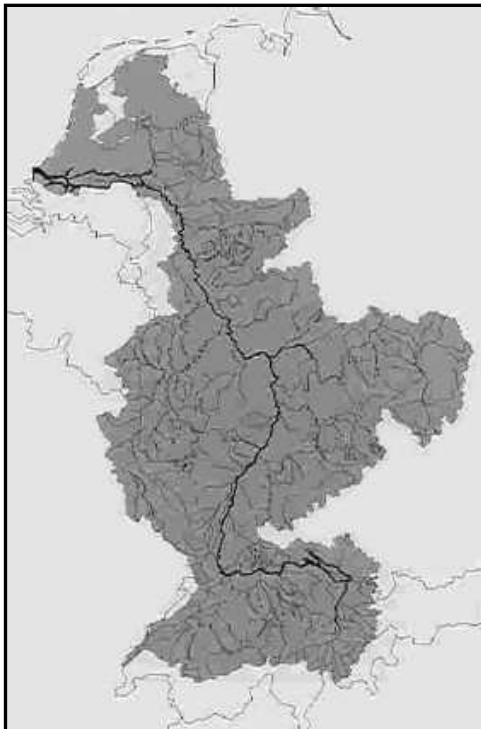
drang Wasser aus dem Vorfluter in die darunter liegende Sandschicht ein, worauf sich der obere Torfteil des Deiches auf der Sandschicht verschob und schliesslich durchbrach.

Ein solches Ereignis könnte nicht bei jedem Deich passieren, da es auch auf die lokale Bodenzusammensetzung ankommt, doch an diesen Torfdeichen, von denen es in Noord-Holland 250 km gibt, sollte etwas unternommen werden, damit Ähnliches nicht noch einmal eintritt. Das Problem ist, dass bei Inspektionen des Deiches bis heute nur durch Betrachten von aussen her Aussagen über die Stabilität gemacht werden können, über eine Messmethode für das Innere des Deiches verfügt man noch nicht [3].

#### 4.2.5 Die wichtige Rolle des IJsselmeers

Nach der Fertigstellung des Deiches für den Noordoostpolder wurde der Sommerpegel des IJsselmeers auf -20 cm NAP (= Normaal Amsterdams Peil, von den Niederlanden festgelegter Nullpunkt des Meeresspiegels) und der Winterpegel auf -40 cm NAP eingestellt. Die Idee dabei war, dass im Winter noch Platz vorhanden ist um Niederschlagswasser aufzunehmen und im Sommer der Süsswasservorrat genügend gross ist. In den letzten zehn Jahren konnte der Winterpegel aber oft nicht eingehalten werden, teilweise betrug er +10 cm NAP. Grund dafür sind die Entwässerungsschleusen im Afsluitdijk, durch welche bei starkem Nordwestwind kein Wasser ins Meer gelassen werden kann, weil das Meerwasser von aussen an sie herangedrückt wird. Beim Afsluitdijk kann das Wasser das IJsselmeer nur durch diese Schleusen verlassen; die andere Möglichkeit wäre das Wegpumpen des Wassers in IJmuiden am anderen Ende des Nordseekanals [9].

Massgebend für den Pegel des IJsselmeers ist der Rhein als wichtigste Wasserquelle, denn rund 10% davon gelangen via IJssel ins IJsselmeer. Heute ist der Rhein ein Regen- und ein Gletscherfluss zugleich. Im Winter fällt der Niederschlag in seinem Einzugsgebiet mancherorts als Schnee, sodass die entsprechende Wassermenge erst im Sommer abfließt und in die Niederlande gelangt.



Im Frühling bringt er während der Schneeschmelze viel Wasser, das im IJsselmeer für den Sommer gespeichert wird. Im Sommer verläuft sein Abfluss dank den schmelzenden Gletschern einigermassen stabil. In Zukunft dürfte dies aber nicht mehr so sein.

Bild 26 Einzugsgebiet des Rheins [9]

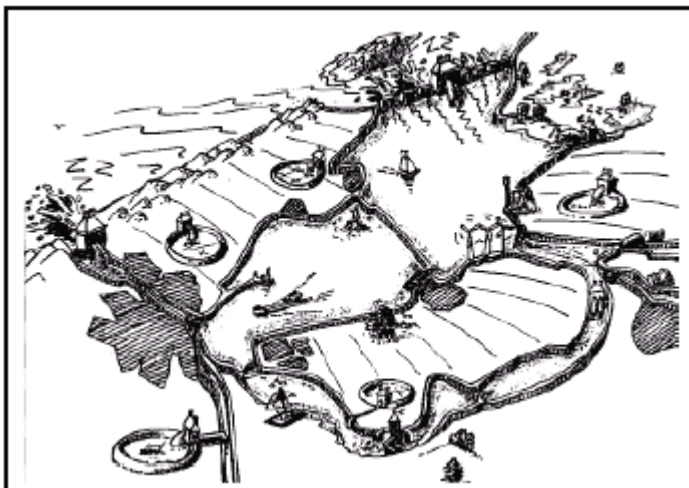


Im Winter wird es auch im (Hoch)gebirge vermehrt regnen statt schneien, sodass zusätzlich zum vielen Wasser, das in den Niederlanden vom Himmel kommt, der Rhein auch noch die vergrösserte Niederschlagsmenge aus seinem Einzugsgebiet heranzführt, das mit 185'000 km<sup>2</sup> nicht gerade eine bescheidene Grösse hat [25]. Im Sommer hingegen sieht es anders aus. Wie in den Niederlanden ist auch im übrigen Europa mit längeren Hitze- und Trockenperioden zu rechnen. Sollten die Alpengletscher einmal geschmolzen sein, ist die Veränderung des Rheins zum totalen Regenfluss vollzogen, d.h. er wird im Sommer viel weniger Wasser führen als bisher. Zusätzlich problematisch für den Pegel des IJsselmeers ist der Anstieg des Meeresspiegels, dadurch kann noch seltener Wasser ins Meer hinaus gelassen werden.

Der Pegel wird sich nicht nur langfristig, sondern auch viel öfters ändern. Die Gegensätze zwischen Winter und Sommer und zwischen nassen und trockenen Perioden im Sommer werden grösser werden und es wird nicht mehr möglich sein, den Winterpegel tiefer zu halten als den Sommerpegel. Gemäss Berechnungen von Rijkswaterstaat (= staatliche Wasserbehörde) wird der Winterpegel 2100 bei einer Temperaturzunahme von 4°C einen Meter höher sein als jetzt, also 60 cm über dem NAP. Damit in diesem Fall kein Land überschwemmt wird, müssten alle Deiche um das IJsselmeer bis zu 2 m erhöht werden.

Gemäss Überlegungen vom Rijkswaterstaat gibt es grundsätzlich drei Strategien für den Wasserhaushalt des IJsselmeeres [9].

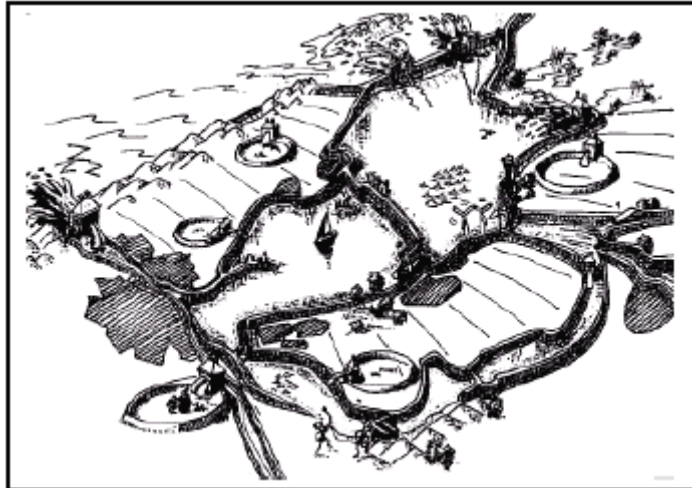
Bild 27 IJsselmeer: Drei Strategien für den Wasserhaushalt [9] a. Wasser abführen. b. Vertikal speichern. c. Horizontal speichern.



*a. Wasser abführen*

Die Devise der ersten lautet, das Wasser sofort abzuführen. Dafür müsste die Durchlasskapazität der Schleusen im Afsluitdijk sowie der Pumpwerke bei IJmuiden vergrössert werden. Abgesehen von der Frage der technischen Machbarkeit hat diese Strategie auch sonst gewichtige Nachteile. Wenn der grösste Teil des Wassers abgepumpt wird, kann kein grosser Süsswasservorrat für den Sommer entstehen, sodass das Wasser für das Durchspülen von versalzten Poldern oder zur Bewässerung in der Landwirtschaft knapp wird. Auch der nötige Pegel in den Poldern dürfte nicht beibehalten werden können, sodass der Boden sinken würde. Zudem wäre bei einer technischen Störung ein riesiges Gebiet betroffen, die Deiche würden nämlich keinen höheren Pegel ertragen.

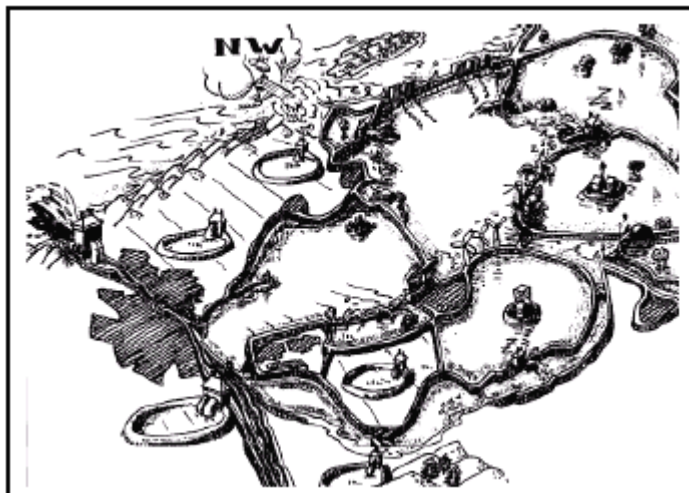
Die Devise der ersten lautet, das Wasser sofort abzuführen. Dafür müsste die Durchlasskapazität der Schleusen im Afsluitdijk sowie der Pumpwerke bei IJmuiden vergrössert werden. Abgesehen von der Frage der technischen Machbarkeit hat diese Strategie auch sonst gewichtige Nachteile. Wenn der grösste Teil des Wassers abgepumpt wird, kann kein grosser Süsswasservorrat für den Sommer entstehen, sodass das Wasser für das Durchspülen von versalzten Poldern oder zur Bewässerung in der Landwirtschaft knapp wird. Auch der nötige Pegel in den Poldern dürfte nicht beibehalten werden können, sodass der Boden sinken würde. Zudem wäre bei einer technischen Störung ein riesiges Gebiet betroffen, die Deiche würden nämlich keinen höheren Pegel ertragen.



### *b. Vertikale Speicherung*

Die zweite Strategie sieht vor, das Wasser vertikal zu speichern, indem man die Deiche erhöht. Auf diese Weise wäre der Süßwasserspeicher zwar gewährleistet, doch die Kosten wären hoch. Allein die Erhöhung der Deiche um das IJsselmeer kostet – wie das sofortige Abführen übrigens auch – etwa 400 Millionen Euro. Dabei ist aber noch nicht eingerechnet, dass auch die Deiche der

Kanäle im Landesinnern erhöht werden müssten und für die ans IJsselmeer angrenzenden Polder mehr Pumpwerke gebaut werden müssten. Um zu verhindern, dass Feuchtgebiete auf der IJsselmeer-Seite der Deiche ständig unter Wasser liegen, könnten diese Gebiete mit Erde aufgeschüttet werden. Das wäre gut für die Natur, doch es geht Raum verloren, in dem Wasser gespeichert werden könnte. Die Folgen eines Deichbruchs wären für einen Teil des Landes schlimm, doch würde nicht das gesamte System davon beeinflusst.



### *c. Horizontale Speicherung*

Anstatt das Wasser vertikal zu speichern sieht die dritte Strategie vor, es horizontal zu speichern. Dazu müssten tief gelegene Polder bei Bedarf unter Wasser gesetzt werden, wofür auch eine Deicherhöhung nötig ist, damit die entsprechenden Polder nicht überlaufen. Die zur Überflutung vorgesehenen Polder könnten aber nicht mehr intensiv genutzt werden. Es geht also viel kostbarer Platz verloren,

von dem es in den Niederlanden sowieso schon fast zu wenig hat. Das gespeicherte Wasser müsste aber bald einmal verarbeitet, sprich ins Meer befördert werden, damit wieder Platz da ist für neues. Dazu ist eventuell auch eine Vergrößerung der Pump- bzw. Durchflussskapazität notwendig. Ein weiterer Nachteil ist, dass es schwierig und zeitraubend ist, abzuschätzen, ob überhaupt ein Polder und, wenn ja, welcher bei dieser bestimmten Situation unter Wasser gesetzt werden soll. Gerade auch aus diesem Grund ist diese Strategie überhaupt nicht effizient, sondern mit 2.5 Milliarden Euro nur kostenintensiv.

Schliesslich entschied sich der Rijkswaterstaat, von einer Temperaturerhöhung um 2°C ausgehend, dafür, bis 2050 mit einer Vergrößerung der Durchlass- und Pumpkapazität auszukommen und danach den Wasserstand gezwungenermassen mit dem Meeresspiegel mitwachsen zu lassen.

#### 4.2.6 Meeresspiegelanstieg

Der steigende Meeresspiegel wirkt sich zwar nicht direkt auf die Polder aus, er ist aber eine Bedrohung für die Sandküste, deren Dünen die Polder vor eindringendem Meerwasser schützen. Der Kampf gegen die Erosion der flachen Küste von Noord-Holland dauert allerdings schon Jahrhunderte. Die von den Wellen verursachte Erosion ist am Strand am grössten und auch am ehesten sichtbar. Ein grosser Teil des Sandes wird etwas meerwärts des Strandes abgelagert, von wo aus er bei einer ruhigen Wetterlage wieder auf den Strand zurück transportiert wird. Doch neben dem Meeresspiegelanstieg ändern mit der Klimaänderung auch die Strömungen, zudem werden Stürme intensiver, was stärkere Wellen ergibt. Mit der starken Süd-Nord-Strömung vor der Küste wird der Sand weiter wegtransportiert. Bereits seit 1991 sind künstliche Sandaufschüttungen nötig sind, um den Strand in gleichem Zustand zu halten [9]. Dies geschieht mit speziell ausgerüsteten Schiffen, den so genannten Schleppkopf-Hopperbaggern. Solche Schiffe können vom Meeresboden 1000-7000m<sup>3</sup> Sand-Wasser-Gemisch ansaugen und verstaunen, um es zur Küste zu bringen.



a



b

Bild 28 a. Küstenerosion [13] und b. Sandaufschüttung [24]

Dort gelangt das Gemisch entweder durch ein System von Rohren an den Strand oder es wird durch eine Klappe direkt unter das Schiff gelassen, von wo es ein Saug-Bagger an den Strand befördert [31]. Je nachdem werden auch vor der Küste Sandbänke aufgeschüttet, welche die Erosion am Strand verkleinern.

In Zukunft wird sich die Erosion verstärken, mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit um 30% wird sich der Sandtransport verdoppeln. Ein starker Nordweststurm (bei dieser Windrichtung können sich die Wellen aus den tiefsten Teilen der Nordsee am stärksten entwickeln) führt bei Ebbe zu grossen Sandverlusten, während bei Flut ein grosser Druck auf die Dünen entsteht.

Wegen der Gezeitenströme wird im Wattenmeer Sand angelagert. Bei Flut kommt das sand- und sedimentführende Wasser schnell herangeströmt bevor es im Wattenmeer stillsteht. Bei Ebbe fliessen die Wellen sehr ruhig, sodass sie den abgesunkenen Sand nicht mitzunehmen vermögen. Daher liegen die Watten bei Ebbe trocken. Wenn nun der Meeresspiegel steigt, sorgt die Strömung dafür, dass diese wichtige Eigenschaft des Wattenmeeres bestehen bleibt, d.h. es wird viel mehr Sand herangeführt, der

hauptsächlich von der Küste von Noord-Holland stammt. Eine kleine Rechnung: Die heutige Gesamtfläche der Watten beträgt 1'800 km<sup>2</sup>. Von der Annahme ausgehend, dass der Meeresspiegel in den nächsten 50 Jahren nur um 30 cm ansteigt, müsste bis 2050 ein Volumen von 540 Millionen m<sup>3</sup> Sand her. 70% davon, also 378 Millionen m<sup>3</sup> kämen von der Küste von Noord-Holland, das macht 7,5 Millionen m<sup>3</sup> pro Jahr. Auch ohne diese Sandnachfrage musste zwischen 1991 und 1995 jährlich 6 Millionen m<sup>3</sup> Sand aufgeschüttet werden! Angenommen der Meeresspiegel steigt schneller als in dieser optimistischen Annahme, kann der Mensch dieser Sanderosion sicher nicht ein Jahrhundert lang den Meister zeigen.



Bild 29 Querdämme ins Meer [Foto L. Frossard]

Dummerweise würde ein Ansteigen des Meeresspiegels einige bisherige Schutzvorrichtungen an Deichen zu schädlichen Einrichtungen machen. So wurden an einigen Orten Querdämme vor einen bestehenden Deich gebaut. Diese ragen senkrecht zur Küstenlinie ins Meer hinaus, um die Strömung vor dem Deich abzuschwächen und somit die Sandsedimentation zu unterstützen.

Wenn der Meeresspiegel ansteigt, verursachen sie aber Strömungswirbel, welche den Sand vermehrt wegtransportieren. Dieser Nachteil bei einer Ansteigung des Meeresspiegels war man sich beim Bau noch nicht bewusst.

## 4.3 Ökologische Auswirkungen

### 4.3.1 Temperaturanstieg

Auf den Wasserhaushalt in den Poldern hat der Temperaturanstieg direkt keinen Einfluss, da der Volumenausdehnungskoeffizient von Wasser mit 0.1% Volumenzunahme bei einer Temperaturerhöhung von 5°C zu klein ist. Die Erwärmung des Klimas geht aber trotzdem nicht unbemerkt an den Poldern vorbei. Wie in anderen Regionen Europas auch, werden in den Poldern Flora und Fauna durch die Temperaturerhöhung beeinflusst.

So hat die Länge der Vegetationszeit, welche in der Natur als Mass für die Erwärmung gilt, im 20. Jahrhundert im Mittel um etwa 25 Tage zugenommen.

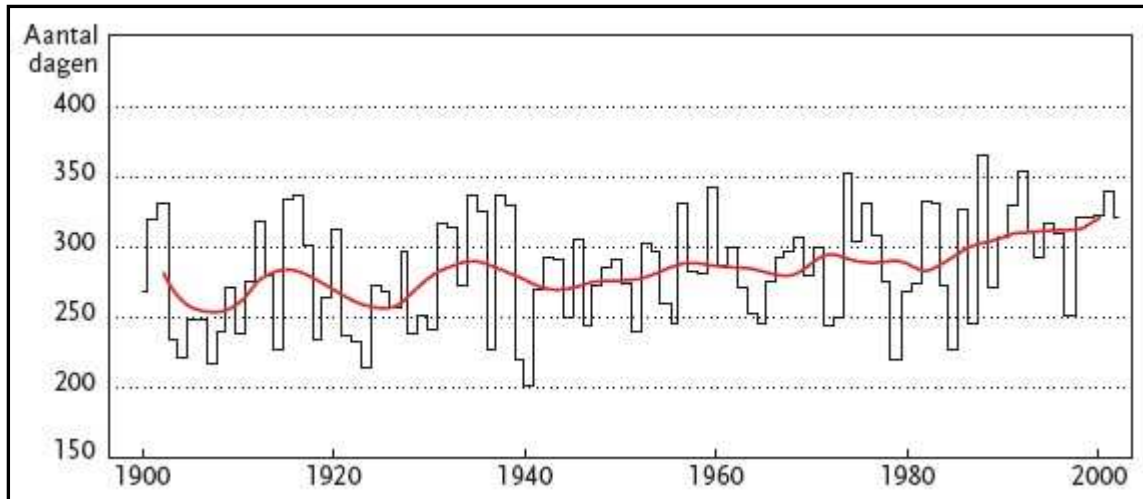


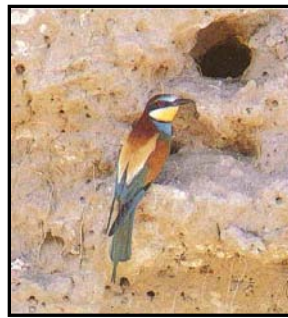
Bild 30 Länge der meteorologischen Vegetationszeit im Laufe des 20. Jh. (Die rote Linie ist der Mittelwert von 10 Jahren) [6]

Die Definition des KNMI für die Vegetationszeit lautet: „Die Anzahl Tage im Jahr zwischen der ersten sechstägigen Periode von mehr als 5°C nach dem 1. Januar und der ersten sechstägigen Periode von weniger als 5°C nach dem 1. Juli.“[6, S.8] Da es in den Niederlanden besonders im Winter und Frühling deutlich wärmer geworden ist, beginnt die Vegetationszeit immer früher. Festgestellt hat man dies unter anderem bei Schneeglöckchen, die heute drei Wochen früher zu blühen beginnen als im Durchschnitt der Jahre 1940-1968, beim Wiesenkerbel sind es sogar 34 Tage.

Neben der veränderten Blühzeit finden aber auch Änderungen bezüglich Artenzusammensetzung statt. Für gewisse Arten ist das wärmere Klima zu warm, sodass sie aus den Poldern verschwinden und sich weiter nach Norden ausbreiten, während andere aus dem subtropischen Raum in den Niederlanden immer mehr vorkommen. So findet man die ursprünglich im Mittelmeergebiet heimische (harmlose) Wespenspinne verbreitet in den Dünen von Noord-Holland. Ein weiterer Zuzüger ist eine ursprünglich in China heimische, einige Zentimeter kleine Süßwasserqualle, die sich im Sommer in den Entwässerungsgräben massiv ausbreitet. Wegen dem wachsenden Angebot an grossen Insekten brüten immer mehr Bienenfresserpärchen in den Niederlanden.



a



b

Bild 31 a. Wespenspinne [2] und b. Bienenfresser [11]

Um Überleben zu können, müssen sich die einheimischen Tiere an den veränderten Lebensrhythmus der Pflanzen anpassen. Tagpfauenaugen werden zum Teil bereits im Januar aktiv und Blattläuse schlüpfen 19 Tage früher, sodass sie auch früher im Jahr auf den Gewächsen anzutreffen sind. Nicht so anpassungsfähig sind offenbar die Meisen. Bei der Aufzucht ihrer Jungen sind sie auf Raupen angewiesen, doch diese sind heutzutage zum Zeitpunkt, wo die Meisen Junge haben, bereits verpuppt oder als Schmetterlinge unterwegs. Die Frage ist nun, ob sich die Meisen noch rechtzeitig anpassen können oder ob sie dann einmal verschwinden [8].

Nicht nur die Luft wird wärmer, sondern auch das Wasser. Dabei verschlechtert sich die Wasserqualität, weil einerseits mehr Algen und Wasserpflanzen wachsen und andererseits mehr Wasser verdunstet, sodass der Pegel sinkt. Wenn eine deutliche Erwärmung bis an den Boden der Gewässer vordringt, halten es dort sesshafte Tiere nicht mehr aus und verschwinden. Da sie als Nahrung für andere Tiere dienen, könnte dies auch zu grösseren Änderungen in den Nahrungsketten führen. Hinzu kommt, dass Pflanzen, die früher im Jahr mit ihrer Entwicklung begonnen haben, oft auch früher absterben, sodass mehr Biomasse produziert wird, welche zu Sauerstoffarmut in den Gewässern führen kann. Die Wasserläufe müssen also in Zukunft gut gepflegt und von toten Tieren und überschüssigen Wasserpflanzen befreit werden, damit die Wasserqualität nicht abnimmt [8].

### 4.3.2 Meeresspiegelanstieg

Wenn der Meeresspiegel ansteigt, wird das aufströmende Grundwasser in den Poldern, besonders in Küstennähe, wahrscheinlich salziger werden. Somit muss auch an der Oberfläche vermehrt mit brackigem oder salzigem Grundwasser gerechnet werden, was Auswirkungen auf Pflanzen und Boden hat. Pflanzen mit einer geringen Salztoleranz werden salzresistenteren Arten Platz machen müssen.



Naturfreunde begrüßen das brackigere Grundwasser, das ursprünglich in den Poldern gang und gäbe war, bevor es nach der Eindeichung des IJsselmeers immer süsser wurde und die typische Brackwasservegetation (z. B. das Löffelkraut) nach und nach verschwand.

Bild 32 Löffelkraut [18]

Dies gilt nicht nur für die natürliche Pflanzenwelt sondern auch für die Landwirtschaftsgewächse.

Für die Landwirtschaft ist Versalzung des Grundwassers aber kein Grund zur Freude, denn um die Erträge konstant zu halten, müssen die Polder öfter mit Süswasser durchgespült werden. Dies wird aber in Zukunft weniger oft möglich sein wegen der Süswasserknappheit im Sommer. Das salzige Grundwasser sorgt auch für eine Versalzung der Böden. Die Pflanze kann in einem solchen Milieu weniger gut Wasser aufnehmen, weil die höhere Salzkonzentration im Boden der Wasseraufnahme in die Wurzel entgegenwirkt. Auch die Bodenstruktur dürfte bei erhöhtem Salzgehalt beeinflusst werden.

Die Anwesenheit von mehr Natrium-Ionen führt zur vermehrten Auswaschung von anderen für die Pflanze wichtige Ionen aus dem Boden, weil Natrium-Ionen wegen ihrer kleinen Grösse besser gebunden werden. Daher müsste mehr Dünger eingesetzt werden, der aber das Grundwasser belastet.

#### **4.4 Wirtschaftliche Auswirkungen**

Der wichtigste Punkt in diesem Kapitel sind die hohen Kosten für alle technischen Massnahmen. Die grössere Pumpkapazität, die Verstärkung der Deiche, die Vergrösserung des Entwässerungssystems, die Sandaufschüttungen etc. – all diese nötigen Massnahmen kosten eine riesige Menge Geld, für das der Staat, die Provinzen oder die „waterschappen“ aufkommen müssen. Einige Schätzungen der Kosten habe ich bereits früher erwähnt, es handelt sich jeweils um Kosten in der Grössenordnung von Dutzenden Millionen bis einige Milliarden Euro.

Wenn jedoch nichts dergleichen unternommen wird, entstehen auch hohe Kosten; nämlich Schäden bei Überschwemmungen oder Ausfälle bei der landwirtschaftlichen Ernte, sei es weil das Feld längere Zeit unter Wasser gestanden hat oder weil die Gewächse Trockenheitsschäden aufweisen.

Auch wenn die in dieser Arbeit beschriebenen Massnahmen getroffen werden, wird sich die Landwirtschaft an das veränderte Klima anpassen müssen. Flexibler gehandhabte Grundwasserstände in den Poldern bedeuten auch, dass das Wasser eine Zeit lang höher steht als es eigentlich für die Landwirtschaft gut wäre. Dies führt zu Ertragseinbussen, welche natürlich einen kleineren Gewinn verursachen. Um dies zu verhindern, könnte man die Wahl der Anbaugewächse an den neuen Grundwasserhaushalt anpassen, doch möglicherweise sind wasserresistentere Sorten auf dem Markt nicht so gut absetzbar, sodass der Endeffekt der gleiche wäre – nämlich weniger Gewinn.

## 5 Fazit

Die Niederländer haben Jahrhunderte lang gegen das Meer gekämpft und ein sicheres Polderentwässerungssystem eingerichtet. Wie meine Untersuchung zeigt, muss dieses jetzt angepasst werden, damit es das Land auch in einem wärmeren Klima mit viel mehr Niederschlag im Winter, langen Trockenperioden im Sommer und mehr Extremereignissen vor Überflutungen schützen kann. Das Hauptproblem für die Polder ist dabei nicht, wie man erwarten könnte, der ansteigende Meeresspiegel, sondern die Umverteilung des Niederschlags. Durch eine Vergrößerung der Pumpkapazität kann dieses Problem aber nicht gelöst werden, da die Kapazität des Vorflutersystems zu klein ist und eine Vergrößerung z.T. aus technischen, vor allem aber aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage kommt. Ausserdem würde dadurch die Trinkwasserversorgung im Sommer gefährdet. Es muss mehr Platz geschaffen werden, um Wasser über längere Zeit speichern zu können. Dabei drängen sich die Verbreiterung der Entwässerungsgräben sowie eine flexiblere Handhabung des Grundwasserpegels auf. Mit dieser Methode ist auch ein eigener kleiner Süßwasservorrat im Sommer gewährleistet, denn das IJsselmeer wird nicht mehr als unerschöpflicher Wasserspeicher dienen können. All diese Massnahmen verursachen hohe Kosten, daneben muss auch die Landwirtschaft an den neuen Wasserhaushalt angepasst werden, z.B. durch den Anbau anderer Kulturen.



## 6 Quellenangaben

1. Bär, O., 1991: *Geographie Europas*. Herausgeber Lehrmittelverlag des Kt. Zürich
2. Bellmann, H., 1992: *Spinnen: beobachten - bestimmen*. Naturbuch Verlag, Augsburg (D)
3. Bericht GeoDelft, 2004: *Kadeverschuiving Wilnis*.
4. Bericht IPCC, 2001: *Climate change 2001: Scientific basis*. Cambridge University Press
5. Bericht IPCC, 2001: *Klimaänderung 2001: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger*. Herausgeber ProClim
6. Bericht KNMI, 2003: *De toestand van het klimaat in Nederland 2003*
7. Bericht OcCC, 2002: *Das Klima ändert - auch in der Schweiz*. Herausgeber OcCC, Bern
8. Buissink, F. & Frons, H., 2004: *De lente begint steeds vroeger*. Landleven, Jan./Febr. S. 96-97
9. Court, Th. de la, 2002: *Noord-Holland op de helling. De effecten van klimaatverandering op de provincie Noord-Holland*. COS Noord-Holland Noord
10. Eijnden, H. van der, 2003: *Veranderend klimaat vraagt visie op water*. De groene long, Maart, S. 8-9
11. Hammond, N. & Everett, M., 1984: *Das Kosmosbuch der Vögel*. Franckh Verlag, Stuttgart (D)
12. <http://home.hccnet.nl/th.bakker/droogmakerij/beemster.htm>
13. <http://home.hetnet.nl/~pjs28/zandsupl.htm>
14. <http://home.tiscali.nl/~wr2777/West-Friesland.htm>
15. [http://nitg.tno.nl/ned/appl/g\\_resources/groundwater](http://nitg.tno.nl/ned/appl/g_resources/groundwater)
16. <http://www.citg.tudelft.nl/gallery/album20/wilnis2>
17. [http://www.digischool.nl/ak/onderbouw-vmbo/materiaal/begrip/b\\_water.htm](http://www.digischool.nl/ak/onderbouw-vmbo/materiaal/begrip/b_water.htm)
18. [http://www.first-nature.com/flowers/cochlearia\\_officinalis.htm](http://www.first-nature.com/flowers/cochlearia_officinalis.htm)
19. <http://www.geocities.com/CapitolHill/Senate/7232/nl/molens2.htm>
20. <http://www.hamburger-bildungserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/klimawandel/atmosphaere/nao1.htm>
21. <http://www.knmi.nl/voorl/weer/>
22. <http://www.natuurinformatie.nl/asp/>
23. <http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl>
24. <http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000267.html>
25. <http://www.nederlandleeftmetwater.nl>: *Waterwijzer 2004/05*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat
26. <http://www.ocean.uni-bremen.de/NAO.htm>
27. <http://www.stedelijkmuseumalkmaar.nl/paginas/7a4e.htm>
28. <http://www.uni-muenster.de/HausDerNiederlande>
29. <http://www.wissenschaft.de/wissen/news/151474.html>
30. Larcher, W., 1980: *Oekologie der Pflanzen auf physiologischer Grundlage*. Ulmer Verlag, Stuttgart (D)
31. Meijer, H., 1996: *Die Niederlande und das Wasser*. IDG Bulletin 1995/96
32. Mörzer Bruijns, M. F. & Benthem, R. J., 1979: *Atlas van de Nederlandse landschappen*. Uitgeverij Het Spectrum, Utrecht (NL)
33. Schönwiese, Ch.-D., 2004: *Globaler Klimawandel im Industriezeitalter*. Geogr. Rundschau 56: S. 4-9
34. Ven, G. P. van der, 2003: *Leefbaar Laagland*. Uitgeverij Matrijs, Utrecht (NL)

## 7 Bildverzeichnis

Bild 1	Konzentration der Treibhausgase im Verlauf der Zeit. Skalen beachten! [7].....	2
Bild 2	Veränderung der globalen mittleren Temperatur von 1850 bis 2000 basierend auf drei Modellsimulationen (a, b und c) im Vergleich mit den beobachteten Temperaturen [7].....	4
Bild 3	Schwankungen der Erdoberflächentemperatur von 1860 bis 2000 [4].....	4
Bild 4	Temperaturtrends pro Jahrzehnt aus den Jahresmitteltemperaturen 1976 bis 2000. Die Trends sind durch die Grössen der Punkte gekennzeichnet (Erwärmung rot, Abkühlung blau) [7].....	5
Bild 5	Lineare prozentuale Trends 1976 bis 1999 des jährlichen Niederschlags der Landgebiete [33]	6
Bild 6	Höhenstufenkarte der Niederlande [34].....	7
Bild 7	Abtrennung der grossen Seen mittels Dämmen von der Zuiderzee (14./15. Jh.). Die einzige offene Verbindung zur Zuiderzee lag bei Edam [34].....	9
Bild 8	Dünenbepflanzung heute [Foto L. Frossard].....	9
Bild 9	Poldermühle [Foto L. Frossard].....	10
Bild 10	Der Schermer vor der Trockenlegung [Postkarte].....	10
Bild 11	Karte der eingedeichten Zuiderzee [1].....	11
Bild 12	Aufbau eines Polders (schematisch) [28].....	12
Bild 13	Poldermühle. Innenansicht (a) und Aussenansicht (b) der Wände aus Schilf [Fotos L. Frossard].....	13
Bild 14	Mühlengang (schematisch) [31].....	13
Bild 15	Polderschema Schermer [34].....	14
Bild 16	a. Querschnitt einer Mühle mit Archimedesschraube [31] und b. Archimedesschraube in bestehender Mühle [Foto L. Frossard].....	15
Bild 17	Im Pumpwerk „Wilhelmina“ [Foto L. Frossard].....	16
Bild 18	Modernes Pumpwerk [Foto L. Frossard].....	16
Bild 19	Windturbinen [Foto L. Frossard].....	17
Bild 20	Dünenlandschaft [Foto L. Frossard].....	18
Bild 21	Velofahrer auf einem Deich [Foto L. Frossard].....	19
Bild 22	Landwirtschaft. a. Milchwirtschaft; b. Ackerbau; c. Schnittblumen [Fotos L. Frossard].....	19
Bild 23	Entwässerungsgraben mit Wasserlinsen [Foto L. Frossard].....	20
Bild 24	Schema des Wasserhaushalts im Modellpolder [L. Frossard].....	23
Bild 25	Deichbruch in Wilnis [16].....	27
Bild 26	Einzugsgebiet des Rheins [9].....	28
Bild 27	IJsselmeer: Drei Strategien für den Wasserhaushalt [9] a. Wasser abführen. b. Vertikal speichern. c. Horizontal speichern. ....	29
Bild 28	a. Küstenerosion [13] und b. Sandaufschüttung [24].....	31
Bild 29	Querdämme ins Meer [Foto L. Frossard].....	32
Bild 30	Länge der meteorologischen Vegetationszeit im Laufe des 20. Jh. (Die rote Linie ist der Mittelwert von 10 Jahren) [6].....	33
Bild 31	a. Wespenspinne [2] und b. Bienenfresser [11].....	33
Bild 32	Löffelkraut [18].....	34

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht der Faktoren, die die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen .....	3
Tabelle 2	Klimaszenario des KNMI für 2100 [6].....	21
Tabelle 3	Klimadaten Station „De Kooy“ (1971-2000) [21] .....	22
Tabelle 4	Niederschlag in De Kooy heute und um 2100 unter der Annahme des hohen Klimaszenarios des KNMI. Der Sommer umfasst die Monate April-September, der Winter Oktober-März. Die Zahl der Regentage wurde für heute und für 2100 angewendet. ....	24
Tabelle 5	Niederschlagsereignis im Modellpolder: 50 mm in 24 h [L. Frossard] .....	24

# 9 Anhang



Karte der Niederlande [Encyclopaedia Britannica, 1983]



Karte der Provinz Noord-Holland nördlich von Amsterdam [Microsoft Encarta Professional 2004]